El tejido del cosmos

Espacio, tiempo y la textura de la realidad



Brian Greene

Índice

El tejido del cosmos

Brian Greene

A Tracy

Elogios para "El tejido del cosmos" de Brian Greene

"Como pura aventura intelectual, esto es lo mejor que hay. . . . Incluso comparado con "Breve *historia del tiempo",* el libro de Greene destaca por su ambición... ...de eliminar el misterio de los conceptos difíciles sin diluir la ciencia". - *Newsday*

"Greene está tan elegante como siempre, atravesando la niebla de la complejidad con perspicacia y claridad. El espacio y el tiempo, incluso se podría decir, se convierten en masilla en sus manos." - *Los Angeles Times*

"Altamente informado, lúcido e ingenioso... . . Simplemente no hay mejor introducción a las extrañas maravillas de la relatividad general y la mecánica cuántica, los campos de conocimiento esenciales para cualquier comprensión real del espacio y el tiempo." -Descubrir

"La curiosidad informada del autor es inspiradora y su entusiasmo contagioso." - *Kansas City Star*

"Alucinante". . . . ...es un físico teórico talentoso y un popularizador con habilidades explicativas virtuosas". - *El Oregoniano*

"Brian Greene es el nuevo Hawking, sólo que mejor". - *The Times* (Londres)

"La atracción gravitatoria de Greene rivaliza con la de un agujero negro". - *Newsweek*

"Greene es un excelente profesor, divertido y rápido... . . Lee [a tus amigos] los pasajes de este libro que te dejan atónito. (Puede que te encuentres leyéndolos cada uno de los párrafos.)" - *The Boston Globe*

"Inagotablemente ingenioso... una lectura obligada para el enorme grupo de lectores laicos atraídos por los misterios de la cosmología." -El Sunday Times

"Las fórmulas prohibidas ya no se interponen entre los lectores en general y los últimos avances de la física: los dones imaginativos de uno de los pioneros que han hecho estos avances han traducido ahora la ciencia matemática en analogías accesibles extraídas de la vida cotidiana y la cultura popular. . . . Los no especialistas disfrutarán de esta excitante incursión en el terreno alienígena que es nuestro propio universo." - *Lista de libros* (reseña estelar)

"Nos promete que algún día podremos explicar cómo el espacio y el tiempo han llegado a existir." -Naturaleza

"Greene nos lleva a los límites del espacio y el tiempo". - *El Guardián*

"Cosas emocionantes... . . Introduce al lector al alucinante paisaje de la física teórica de vanguardia, donde las matemáticas mandan supremamente." - *The News & Observer*

"Uno de los libros de ciencia popular más entretenidos y que invitan a la reflexión que ha surgido en los últimos años.*El Universo Elegante* fue finalista del Premio Pulitzer. "*La Tela del Cosmos* merece ganarlo." - *Mundo de la Física*

"En el espacio de 500 páginas legibles, Greene nos ha llevado al borde de la física del siglo XXI con el mínimo de molestias". - *El Heraldo*

"Si alguien puede popularizar la ciencia dura, es Greene." - *Entertainment Weekly*

"Greene es un maravilloso y talentoso exponente de la física. . . . Es un placer leerlo". -Economista

"Magnífico... hace temblar la columna vertebral". - *Financial Times*

"Este es un escrito de ciencia popular de la más alta calidad. . . . Greene [tiene] una capacidad sin igual para traducir las matemáticas superiores al lenguaje e imágenes cotidianas, mediante el uso hábil de la metáfora y la analogía, y una prosa nítida e ingeniosa. . . . No sólo aclara los conceptos, sino que explica por qué son importantes". - *Publishers Weekly* (reseña estelar)

Prefacio

El espacio y el tiempo capturan la imaginación como ningún otro tema científico. Por una buena razón. Forman la arena de la realidad, el tejido mismo del cosmos. Toda nuestra existencia, todo lo que hacemos, pensamos y experimentamos, tiene lugar en alguna región del espacio durante algún intervalo de tiempo. Sin embargo, la ciencia todavía está luchando por entender lo que el espacio y el tiempo son en realidad. ¿Son entidades físicas reales o simplemente ideas útiles? Si son reales, ¿son fundamentales o surgen de componentes más básicos? ¿Qué significa que el espacio esté vacío? ¿Tiene el tiempo un comienzo? ¿Tiene una flecha que fluye inexorablemente del pasado al futuro, como indica la experiencia común? ¿Podemos manipular el espacio y el tiempo? En este libro, seguimos trescientos años de apasionada investigación científica en busca de respuestas, o al menos vislumbres de respuestas, a preguntas tan básicas pero profundas sobre la naturaleza del universo.

Nuestro viaje también nos lleva repetidamente a otra cuestión estrechamente relacionada, tan abarcadora como esquiva: ¿Qué *es la* realidad? Los humanos sólo tenemos acceso a las experiencias internas de percepción y pensamiento, así que ¿cómo podemos estar seguros de que reflejan verdaderamente un mundo externo? Los filósofos han reconocido este problema desde hace mucho tiempo. Los cineastas lo han popularizado a través de líneas de historia que involucran mundos artificiales, generadas por una estimulación neurológica finamente ajustada que existe únicamente dentro de las mentes de sus protagonistas. Y los físicos como yo somos muy conscientes de que la realidad que observamos -la materia que evoluciona en el escenario del espacio y el tiempo- puede tener poco que ver con la realidad, si es que existe, que está ahí fuera. Sin embargo, como las observaciones son todo lo que tenemos, las tomamos en serio. Elegimos como guías los datos duros y el marco de las matemáticas, no la imaginación desenfrenada o el escepticismo implacable, y buscamos las teorías más simples pero de mayor alcance capaces de explicar y predecir el resultado de los experimentos actuales y futuros. Esto restringe severamente las teorías que perseguimos. (En este libro, por ejemplo, no encontraremos una pista de que estoy flotando en un tanque, conectado a miles de cables estimulantes del cerebro, haciéndome *pensar simplemente* que estoy escribiendo este texto). Pero durante los últimos cien años, los descubrimientos en la física han sugerido revisiones a nuestro sentido de la realidad cotidiana que son tan dramáticas, tan alucinantes, y tan paradigmáticas como la ciencia ficción más imaginativa. Estos trastornos revolucionarios enmarcarán nuestro paso por las páginas que siguen.

Muchas de las preguntas que exploramos son las mismas que, de varias maneras, surcaron las cejas de Aristóteles, Galileo, Newton, Einstein, y otros innumerables a través de los tiempos. Y como este libro busca transmitir la ciencia en ciernes, seguimos estas preguntas tal como han sido declaradas por una generación, volcadas por sus sucesores, y refinadas y reinterpretadas por los científicos en los siglos siguientes.

Por ejemplo, en la desconcertante cuestión de si el espacio completamente vacío es, como un lienzo en blanco, una entidad real o simplemente una idea abstracta, seguimos el péndulo de la opinión científica a medida que oscila entre la declaración de Isaac Newton en el siglo XVII de que el espacio es real, la conclusión de Ernst Mach en el siglo XIX de que no lo es, y la dramática reformulación de la propia cuestión por parte de Einstein en el siglo XX, en la que fusionó el espacio y el tiempo, y refutó en gran medida a Mach. A continuación nos encontramos con descubrimientos posteriores que transformaron la cuestión una vez más al redefinir el significado de "vacío", previendo que el espacio está inevitablemente impregnado de lo que se llaman campos cuánticos y posiblemente una energía uniforme difusa llamada constante cosmológica - ecos modernos de la vieja y desacreditada noción de un éter que llena el espacio. Lo que es más, describimos cómo los próximos experimentos basados en el espacio pueden confirmar características particulares de las conclusiones de Mach que coinciden con la relatividad general de Einstein, ilustrando bien la fascinante y enmarañada red del desarrollo científico.

En nuestra propia era encontramos las gratificantes percepciones de la cosmología inflacionaria sobre la flecha del tiempo, el rico surtido de dimensiones extra espaciales de la teoría de cuerdas, la sugerencia radical de la teoría M de que el espacio que habitamos puede ser sólo una astilla flotando en un cosmos más grande, y la salvaje especulación actual de que el universo que vemos puede no ser más que un holograma cósmico. Aún no sabemos si la más reciente de estas propuestas teóricas es correcta. Pero por muy escandalosas que suenen, las investigamos a fondo porque a ellas conduce nuestra obstinada búsqueda de las leyes más profundas del universo. No sólo puede surgir una realidad extraña y desconocida de la fértil imaginación de la ciencia ficción, sino que también puede surgir de los hallazgos de vanguardia de la física moderna.

La Tela del Cosmos está destinada principalmente al lector general que tiene poca o ninguna formación formal en las ciencias, pero cuyo deseo de comprender el funcionamiento del universo proporciona un incentivo para lidiar con una serie de conceptos complejos y desafiantes. Como en mi primer libro, *El Universo Elegante, me he mantenido* cerca de las ideas científicas fundamentales, mientras que he eliminado los detalles matemáticos en favor de metáforas, analogías, historias e ilustraciones. Cuando llegamos a las secciones más difíciles del libro, advierto al lector y proporciono breves resúmenes para aquellos que deciden saltarse o pasar por alto estas discusiones más complejas. De esta manera, el lector debería ser capaz de recorrer el camino del descubrimiento y obtener no sólo el conocimiento de la actual visión del mundo de la física, sino también la comprensión de cómo y por qué esa visión del mundo ha ganado prominencia.

Los estudiantes, los ávidos lectores de la ciencia de nivel general, los profesores y los profesionales también deberían encontrar mucho interés en el libro. Aunque los capítulos iniciales cubren el material de fondo necesario pero estándar en

relatividad y mecánica cuántica, el enfoque en la corporeidad del espacio y el tiempo es algo poco convencional en su planteamiento. Los capítulos posteriores abarcan una amplia gama de temas -el teorema de Bell, experimentos de elección diferida, medición cuántica, expansión acelerada, la posibilidad de producir agujeros negros en la próxima generación de aceleradores de partículas, extravagantes máquinas del tiempo de los agujeros de gusano, por nombrar algunos- y así pondrá al día a esos lectores en una serie de los avances más tentadores y debatidos.

Parte del material que cubro es controvertido. Para aquellos temas que permanecen en el aire, he discutido los principales puntos de vista en el texto principal. En cuanto a los puntos de discusión que creo que han logrado un mayor consenso, he relegado los diferentes puntos de vista a las notas. Algunos científicos, especialmente los que sostienen opiniones minoritarias, pueden discrepar de algunos de mis juicios, pero a través del texto principal y las notas, me he esforzado por un tratamiento equilibrado. En las notas, el lector particularmente diligente también encontrará explicaciones más completas, aclaraciones y advertencias pertinentes a los puntos que he simplificado, así como (para los que se inclinan por ello) breves contrapartidas matemáticas al enfoque sin ecuaciones adoptado en el texto principal. Un breve glosario proporciona una referencia rápida para algunos de los términos científicos más especializados.

Ni siquiera un libro de esta longitud puede agotar el vasto tema del espacio y el tiempo. Me he centrado en aquellos rasgos que encuentro excitantes y esenciales para formar una imagen completa de la realidad pintada por la ciencia moderna. Sin duda, muchas de estas opciones reflejan el gusto personal, y por eso pido disculpas a aquellos que sienten que su propio trabajo o área de estudio favorita no recibe la atención adecuada.

Mientras escribía *La Tela del Cosmos, he tenido la suerte* de recibir valiosos comentarios de un número de dedicados lectores. Raphael Kasper, Lubos Motl, David Steinhardt y Ken Vineberg leyeron varias versiones de todo el manuscrito, a veces repetidamente, y ofrecieron numerosas, detalladas y perspicaces sugerencias que mejoraron sustancialmente tanto la claridad como la precisión de la presentación. Les ofrezco mi más sincero agradecimiento. David Albert, Ted Baltz, Nicholas Boles, Tracy Day, Peter Demchuk, Richard Easther, Anna Hall, Keith Goldsmith, Shelley Goldstein, Michael Gordin, Joshua Greene, Arthur Greenspoon, Gavin Guerra, Sandra Kauffman, Edward Kastenmeier, Robert Krulwich, Andrei Linde, Shani Offen, Maulik Parikh, Michael Popowits, Marlin Scully, John Stachel y Lars Straeter leyeron todo o parte del manuscrito, y sus comentarios fueron extremadamente útiles. Me beneficié de las conversaciones con Andreas Albrecht, Michael Bassett, Sean Carrol, Andrea Cross, Rita Greene, Wendy Greene, Susan Greene, Alan Guth, Mark Jackson, Daniel Kabat, Will Kinney, Justin Khoury, Hiranya Peiris, Saul Perlmutter, Koenraad Schalm, Paul Steinhardt, Leonard Susskind, Neil Turok, Henry Tye, William Warmus y Erick

Weinberg. Debo un agradecimiento especial a Raphael Gunner, cuyo agudo sentido del argumento genuino y cuya disposición a criticar varios de mis intentos resultó ser inestimable. Eric Martínez proporcionó una crítica e incansable ayuda en la fase de producción del libro, y Jason Severs hizo un trabajo estelar en la creación de las ilustraciones. Agradezco a mis agentes, Katinka Matson y John Brockman. Y tengo una gran deuda de gratitud con mi editor, Marty Asher, por proporcionar un manantial de aliento, asesoramiento y aguda perspicacia que mejoró sustancialmente la calidad de la presentación.

Durante el curso de mi carrera, mi investigación científica ha sido financiada por el Departamento de Energía, la Fundación Nacional de Ciencias y la Fundación Alfred P. Sloan. Agradezco su apoyo.

I - LA ARENA DE LA REALIDAD

1 - Caminos hacia la realidad

EL ESPACIO, EL TIEMPO, Y POR QUÉ LAS COSAS SON COMO SON

Ninguno de los libros de la polvorienta estantería de mi padre estaba prohibido. Sin embargo, mientras crecía, nunca vi a nadie quitar uno. La mayoría eran tomos enormes - una historia completa de la civilización, volúmenes de las grandes obras de la literatura occidental, muchos otros que ya no puedo recordar - que parecían casi fundidos en estanterías que se inclinaban ligeramente tras décadas de apoyo firme. Pero en el estante más alto había un pequeño y delgado texto que, de vez en cuando, me llamaba la atención porque parecía tan fuera de lugar, como Gulliver entre los Brobdingnagians. En retrospectiva, no estoy muy seguro de por qué esperé tanto tiempo antes de echar un vistazo. Tal vez, con el paso de los años, los libros parecían menos material que uno lee y más reliquias familiares que uno admira desde lejos. En última instancia, tal reverencia dio paso a un descaro adolescente. Alcancé el pequeño texto, lo desempolvé y lo abrí en la página uno. Las primeras líneas fueron, por decir lo menos, sorprendentes.

"Sólo hay un problema verdaderamente filosófico, y es el suicidio", comenzó el texto. Hice un gesto de dolor. "Si el mundo tiene o no tres dimensiones o la mente nueve o doce categorías", continuaba, "viene después"; tales preguntas, explicaba el texto, eran parte del juego que la humanidad jugaba, pero merecían atención sólo después de que se hubiera resuelto el único problema verdadero. El libro era *El mito de Sísifo* y fue escrito por el filósofo de origen argelino y premio Nobel Albert Camus. Después de un momento, la frialdad de sus palabras se derritió

bajo la luz de la comprensión. Sí, por supuesto, pensé. Puedes reflexionar sobre esto o analizar aquello hasta que las vacas vuelvan a casa, pero la verdadera pregunta es si todas tus reflexiones y análisis te convencerán de que vale la pena vivir. A eso se reduce todo. Todo lo demás son detalles.

Mi encuentro casual con el libro de Camus debió ocurrir durante una fase especialmente impresionable, porque, más que nada de lo que había leído, sus palabras se quedaron conmigo. Una y otra vez me imaginaba cómo varias personas que había conocido, o escuchado, o visto en la televisión responderían a esta primera pregunta. En retrospectiva, sin embargo, fue su segunda afirmación -sobre el papel del progreso científico- la que, para mí, resultó ser particularmente desafiante. Camus reconoció el valor de comprender la estructura del universo, pero hasta donde yo pude ver, rechazó la posibilidad de que tal comprensión pudiera hacer alguna diferencia en nuestra evaluación del valor de la vida. Ahora, ciertamente, mi lectura adolescente de la filosofía existencial era tan sofisticada como la lectura de Bart Simpson de la poesía romántica, pero aún así, la conclusión de Camus me pareció fuera de lugar. Para este aspirante a físico, parecía que una evaluación informada de la vida requería una comprensión completa del ámbito de la vida - el universo. Recuerdo haber pensado que si nuestra especie vivía en afloramientos cavernosos enterrados en las profundidades del subsuelo y, por lo tanto, aún no había descubierto la superficie de la Tierra, la brillante luz solar, la brisa del océano y las estrellas que se encuentran más allá, o si la evolución había procedido por un camino diferente y aún no habíamos adquirido nada más que el sentido del tacto, así que todo lo que sabíamos provenía sólo de nuestras impresiones táctiles de nuestro entorno inmediato, o si las facultades mentales humanas dejaban de desarrollarse durante la primera infancia, de modo que nuestras habilidades emocionales y analíticas nunca progresaron más allá de las de un niño de cinco años; en resumen, si nuestras experiencias no eran más que un mísero retrato de la realidad, nuestra valoración de la vida se vería totalmente comprometida. Cuando finalmente encontramos nuestro camino hacia la superficie de la Tierra, o cuando finalmente obtuvimos la habilidad de ver, oír, oler y saborear, o cuando nuestras mentes fueron finalmente liberadas para desarrollarse como lo hacen normalmente, nuestra visión colectiva de la vida y del cosmos cambiaría, por necesidad, radicalmente. Nuestra comprensión de la realidad, previamente comprometida, habría arrojado una luz muy diferente sobre la más fundamental de todas las cuestiones filosóficas.

Pero, podría preguntarse, ¿qué pasa con eso? Seguramente, cualquier evaluación sobria concluiría que aunque no entendamos todo sobre el universo, cada aspecto del comportamiento de la materia o el funcionamiento de la vida, estamos al tanto de los rasgos definidos y amplios que adornan el lienzo de la naturaleza. Seguramente, como insinuó Camus, el progreso en la física, como la comprensión del número de dimensiones del espacio; o el progreso en la neuropsicología, como la comprensión de todas las estructuras organizativas del cerebro; o, para el caso,

el progreso en cualquier otro número de emprendimientos científicos puede llenar detalles importantes, pero su impacto en nuestra evaluación de la vida y la realidad sería mínimo. Seguramente, la realidad es lo que pensamos que es; la realidad se nos revela por nuestras experiencias.

De una forma u otra, esta visión de la realidad es la que muchos de nosotros tenemos, aunque sea implícitamente. Ciertamente me encuentro pensando de esta manera en la vida diaria; es fácil ser seducido por la cara que la naturaleza revela directamente a nuestros sentidos. Sin embargo, en las décadas desde el primer encuentro con el texto de Camus, he aprendido que la ciencia moderna cuenta una historia muy diferente. *La lección general* que ha surgido de la investigación científica durante el último siglo es que la experiencia humana es a menudo una guía engañosa de la verdadera naturaleza de la realidad. Yaciendo justo debajo de la superficie de lo cotidiano *es* un mundo que difícilmente reconoceríamos. Los seguidores de lo oculto, los devotos de la astrología y aquellos que se aferran a los principios religiosos que hablan de una realidad más allá de la experiencia han llegado, desde perspectivas muy variadas, hace mucho tiempo a una conclusión similar. Pero eso no es lo que tengo en mente. Me refiero al trabajo de ingeniosos innovadores e incansables investigadores -los hombres y mujeres de la ciencia- que han pelado capa tras capa de la cebolla cósmica, enigma tras enigma, y han revelado un universo que es a la vez sorprendente, desconocido, excitante, elegante y completamente distinto de lo que nadie esperaba.

Estos desarrollos son todo menos detalles. Los avances en la física han forzado, y continúan forzando, revisiones dramáticas en nuestra concepción del cosmos. Sigo tan convencido ahora como hace décadas de que Camus eligió correctamente el valor de la vida como la cuestión última, pero los conocimientos de la física moderna me han persuadido de que evaluar la vida a través de la lente de la experiencia cotidiana es como mirar un Van Gogh a través de una botella de Coca-Cola vacía. La ciencia moderna ha encabezado un asalto tras otro sobre las pruebas recogidas de nuestras percepciones rudimentarias, mostrando que a menudo producen una concepción nublada del mundo que habitamos. Y así, mientras que Camus separó las preguntas físicas y las etiquetó como secundarias, me he convencido de que son primarias. Para mí, la realidad física establece el escenario y proporciona la iluminación para lidiar con la pregunta de Camus. Evaluar la existencia mientras no se abrazan las ideas de la física moderna sería como luchar en la oscuridad con un oponente desconocido. Al profundizar nuestra comprensión de la verdadera naturaleza de la realidad física, reconfiguramos profundamente nuestro sentido de nosotros mismos y nuestra experiencia del universo.

La preocupación central de este libro es explicar algunas de las más prominentes y fundamentales de estas revisiones de nuestra imagen de la realidad, con un intenso enfoque en aquellas que afectan al proyecto a largo plazo de nuestra

especie para entender el espacio y el tiempo. Desde Aristóteles a Einstein, desde el astrolabio al Telescopio Espacial Hubble, desde las pirámides a los observatorios de las cimas de las montañas, el espacio y el tiempo han enmarcado el pensamiento desde que se empezó a pensar. Con el advenimiento de la era científica moderna, su importancia no ha hecho más que aumentar. En los últimos tres siglos, los avances en la física han revelado que el espacio y el tiempo son los conceptos más desconcertantes y convincentes, y los que más contribuyen a nuestro análisis científico del universo. Tales desarrollos también han demostrado que el espacio y el tiempo encabezan la lista de construcciones científicas ancestrales que están siendo fantásticamente revisadas por la investigación de vanguardia.

Para Isaac Newton, el espacio y el tiempo simplemente eran... formaban un escenario cósmico inerte y universal en el que se desarrollaban los acontecimientos del universo. Para su contemporáneo y frecuente rival Gottfried Wilhelm von Leibniz, el "espacio" y el "tiempo" eran simplemente el vocabulario de las relaciones entre el lugar donde se encontraban los objetos y el momento en que se producían los acontecimientos. Nada más. Pero para Albert Einstein, el espacio y el tiempo eran la materia prima subyacente a la realidad. A través de sus teorías de la relatividad, Einstein sacudió nuestro pensamiento sobre el espacio y el tiempo y reveló el papel principal que juegan en la evolución del universo. Desde entonces, el espacio y el tiempo han sido las brillantes joyas de la física. Son a la vez familiares y desconcertantes; comprender plenamente el espacio y el tiempo se ha convertido en el reto más desalentador y el premio más codiciado de la física.

Los desarrollos que cubriremos en este libro entretejen el tejido del espacio y el tiempo de varias maneras. Algunas ideas desafiarán características del espacio y el tiempo tan básicas que durante siglos, si no milenios, han parecido incuestionables. Otras buscarán el vínculo entre nuestra comprensión teórica del espacio y el tiempo y los rasgos que comúnmente experimentamos. Y otras plantearán cuestiones insondables dentro de los limitados límites de las percepciones ordinarias.

Hablaremos mínimamente de filosofía (y nada de suicidio y del sentido de la vida). Pero en nuestra búsqueda científica para resolver los misterios del espacio y el tiempo, no tendremos restricciones. Desde la más pequeña mancha del universo y los primeros momentos hasta los más lejanos alcances y el futuro más lejano, examinaremos el espacio y el tiempo en entornos familiares y lejanos, con un ojo inquieto buscando su verdadera naturaleza. Como la historia del espacio y el tiempo aún no se ha escrito completamente, no llegaremos a ninguna evaluación final. Pero nos encontraremos con una serie de acontecimientos -algunos intensamente extraños, otros profundamente satisfactorios, algunos verificados experimentalmente, otros completamente especulativos- que mostrarán lo cerca

que hemos estado de envolver nuestras mentes alrededor del tejido del cosmos y de tocar la verdadera textura de la realidad.

La realidad clásica

Los historiadores difieren en cuanto a la fecha exacta en que comenzó la era científica moderna, pero ciertamente para cuando Galileo Galilei, René Descartes, e Isaac Newton habían dado su opinión, ya estaba en marcha. En esos días, la nueva mentalidad científica se estaba forjando constantemente, ya que los patrones encontrados en los datos terrestres y astronómicos hacían cada vez más claro que hay un orden en todas las idas y venidas del cosmos, un orden accesible al razonamiento cuidadoso y al análisis matemático. Estos primeros pioneros del pensamiento científico moderno argumentaron que, cuando se mira de la manera correcta, los acontecimientos del universo no sólo son explicables sino también predecibles. El poder de la ciencia para predecir aspectos del futuro, consistente y cuantitativamente, había sido revelado.

Los primeros estudios científicos se centraron en el tipo de cosas que uno podría ver o experimentar en la vida cotidiana. Galileo arrojó pesos desde una torre inclinada (o así lo dice la leyenda) y observó bolas rodando por superficies inclinadas; Newton estudió las manzanas que caían (o así lo dice la leyenda) y la órbita de la Luna. El objetivo de estas investigaciones era sintonizar el naciente oído científico con las armonías de la naturaleza. Por supuesto, la realidad física era la materia de la experiencia, pero el desafío era escuchar la rima y la razón detrás del ritmo y la regularidad. Muchos héroes cantados y no cantados contribuyeron al rápido e impresionante progreso que se hizo, pero Newton se robó el espectáculo. Con un puñado de ecuaciones matemáticas, sintetizó todo lo conocido sobre el movimiento en la tierra y en los cielos, y al hacerlo, compuso la partitura de lo que ha llegado a conocerse como *física clásica.*

En las décadas que siguieron al trabajo de Newton, sus ecuaciones se desarrollaron en una elaborada estructura matemática que extendió significativamente tanto su alcance como su utilidad práctica. La física clásica se convirtió gradualmente en una sofisticada y madura disciplina científica. Pero brillando claramente a través de todos estos avances fue el faro de las ideas originales de Newton. Incluso hoy, más de trescientos años después, se pueden ver las ecuaciones de Newton garabateadas en pizarras de física introductoria en todo el mundo, impresas en los planes de vuelo de la NASA que computan las trayectorias de las naves espaciales, e incrustadas en los complejos cálculos de la investigación de vanguardia. Newton trajo una gran cantidad de fenómenos físicos dentro de un único marco teórico.

Pero mientras formulaba sus leyes de movimiento, Newton se encontró con un obstáculo crítico, uno que es de particular importancia para nuestra historia

(Capítulo 2). Todo el mundo sabía que las cosas podían moverse, pero ¿qué pasa con la arena en la que el movimiento se produjo? Bueno, eso es el espacio, todos responderíamos. Pero, Newton respondería, ¿qué *es el espacio*? ¿Es el espacio una entidad física real o es una idea abstracta nacida de la lucha humana por comprender el cosmos? Newton se dio cuenta de que esta pregunta clave tenía que ser respondida, porque sin tomar una posición sobre el significado del espacio y el tiempo, sus ecuaciones que describen el movimiento resultarían sin sentido. La comprensión requiere contexto; la perspicacia debe estar anclada.

Y así, con unas pocas y breves frases en su *Principia Mathematica,* Newton articuló una concepción del espacio y el tiempo, declarándolos entidades absolutas e inmutables que proveían al universo de una arena rígida e inmutable. De acuerdo con Newton, el espacio y el tiempo suministraban un andamiaje invisible que daba al universo forma y estructura.

No todos estuvieron de acuerdo. Algunos argumentaron persuasivamente que no tenía sentido atribuir la existencia a algo que no se puede sentir, comprender o afectar. Pero el poder explicativo y predictivo de las ecuaciones de Newton acalló a los críticos. Durante los siguientes doscientos años, su concepción absoluta del espacio y el tiempo fue un dogma.

La realidad relativista

La clásica visión del mundo newtoniana era agradable. No sólo describía los fenómenos naturales con una precisión sorprendente, sino que los detalles de la descripción -las matemáticas- se alineaban estrechamente con la experiencia. Si presionas algo, se acelera. Cuanto más fuerte lanzas una pelota, más impacto tiene cuando choca contra una pared. Si presionas contra algo, sientes que te está presionando. Cuanto más masiva es algo, más fuerte es su atracción gravitacional. Estas son algunas de las propiedades más básicas del mundo natural, y cuando aprendes el marco de Newton, las ves representadas en sus ecuaciones, claras como el día. A diferencia del inescrutable hocus-pocus de una bola de cristal, el funcionamiento de las leyes de Newton se mostraba para que todos con un mínimo de entrenamiento matemático lo asimilaran completamente. La física clásica proporcionó una base rigurosa para la intuición humana.

Newton había incluido la fuerza de gravedad en sus ecuaciones, pero no fue hasta la década de 1860 que el científico escocés James Clerk Maxwell amplió el marco de la física clásica para tener en cuenta las fuerzas eléctricas y magnéticas. Maxwell necesitaba ecuaciones adicionales para hacerlo y las matemáticas que empleaba requerían un mayor nivel de entrenamiento para comprenderlas plenamente. Pero sus nuevas ecuaciones fueron tan exitosas para explicar los fenómenos eléctricos y magnéticos como las de Newton para describir el

movimiento. A finales del siglo XIX, era evidente que los secretos del universo no se podían comparar con el poder del intelectual humano.

De hecho, con la exitosa incorporación de la electricidad y el magnetismo, había una creciente sensación de que la física teórica pronto estaría completa. Algunos sugirieron que la física se estaba convirtiendo rápidamente en una materia terminada y que sus leyes serían pronto cinceladas en piedra. En 1894, el renombrado físico experimental Albert Michelson observó que "la mayoría de los grandes principios subyacentes han quedado firmemente establecidos" y citó a un "eminente científico" -la mayoría cree que fue el físico británico Lord Kelvin- que decía que todo lo que quedaba eran detalles de la determinación de algunos números con un mayor número de decimales.[1] En 1900, el propio Kelvin observó que "dos nubes" se cernían sobre el horizonte, una relacionada con las propiedades del movimiento de la luz y la otra con los aspectos de la radiación que emiten los objetos cuando se calientan, [2] pero la sensación general era que se trataba de meros detalles que, sin duda, pronto se abordarían.

En una década, todo cambió. Como se esperaba, los dos problemas que Kelvin había planteado se abordaron con prontitud, pero resultaron ser cualquier cosa menos menores. Cada uno encendió una revolución, y cada uno requirió una reescritura fundamental de las leyes de la naturaleza. Las concepciones clásicas del espacio, el tiempo y la realidad, que durante cientos de años no sólo habían funcionado sino que también habían expresado de forma concisa nuestro sentido intuitivo del mundo, fueron derrocadas.

La revolución de la relatividad, que abordó la primera de las "nubes" de Kelvin, data de 1905 y 1915, cuando Albert Einstein completó sus teorías especiales y generales de la relatividad (Capítulo 3). Mientras luchaba con los rompecabezas relacionados con la electricidad, el magnetismo y el movimiento de la luz, Einstein se dio cuenta de que la concepción de Newton del espacio y el tiempo, la piedra angular de la física clásica, era errónea. Durante el curso de unas pocas semanas intensas en la primavera de 1905, determinó que el espacio y el tiempo no son independientes y absolutos, como Newton había pensado, sino que están enmarañados y son relativos de una manera que va en contra de la experiencia común. Unos diez años más tarde, Einstein martilló un último clavo en el ataúd newtoniano reescribiendo las leyes de la física gravitacional. Esta vez, Einstein no sólo demostró que el espacio y el tiempo son parte de un todo unificado, sino que también demostró que al combarse y curvarse participan en la evolución cósmica. Lejos de ser las rígidas e inmutables estructuras imaginadas por Newton, el espacio y el tiempo en la reelaboración de Einstein son flexibles y dinámicos.

Las dos teorías de la relatividad están entre los logros más preciados de la humanidad, y con ellas Einstein derribó la concepción de la realidad de Newton. Aunque la física newtoniana parecía capturar matemáticamente mucho de lo que experimentamos físicamente, la realidad que describe resulta no ser la realidad de

nuestro mundo. La nuestra es una realidad relativista. Sin embargo, debido a que la desviación entre la realidad clásica y la relativista sólo se manifiesta en condiciones extremas (como los extremos de velocidad y gravedad), la física newtoniana sigue proporcionando una aproximación que resulta extremadamente precisa y útil en muchas circunstancias. Pero la utilidad y la realidad son normas muy diferentes. Como veremos, las características del espacio y el tiempo que para muchos de nosotros son una segunda naturaleza han resultado ser producto de una falsa perspectiva newtoniana.

La realidad cuántica

La segunda anomalía a la que Lord Kelvin se refirió llevó a la revolución cuántica, uno de los mayores trastornos a los que se ha sometido el entendimiento humano moderno. Para cuando los fuegos se apagaron y el humo se disipó, el barniz de la física clásica se había chamuscado en el nuevo marco emergente de la realidad cuántica.

Una característica fundamental de la física clásica es que si conoces las posiciones y velocidades de todos los objetos en un momento determinado, las ecuaciones de Newton, junto con su actualización Maxwelliana, pueden decirte sus posiciones y velocidades en cualquier otro momento, pasado o futuro. Sin equivocarse, la física clásica declara que el pasado y el futuro están grabados en el presente. Esta característica también es compartida por la relatividad especial y la general. Aunque los conceptos relativistas de pasado y futuro son más sutiles que sus conocidos homólogos clásicos (Capítulos 3 y 5), las ecuaciones de la relatividad, junto con una evaluación completa del presente, las determinan de forma igual de completa.

Sin embargo, en la década de 1930, los físicos se vieron obligados a introducir un esquema conceptual totalmente nuevo llamado mecánica cuántica. De forma bastante inesperada, descubrieron que sólo las leyes cuánticas eran capaces de resolver una gran cantidad de enigmas y explicar una variedad de datos recién adquiridos del reino atómico y subatómico. Pero de acuerdo con las leyes cuánticas, incluso si se hacen las mediciones más perfectas posibles de cómo son las cosas hoy en día, lo mejor que se puede esperar es predecir la *probabilidad de* que las cosas sean de una manera u otra en algún momento elegido en el futuro, o que las cosas sean de una manera u otra en algún momento elegido en el pasado. El universo, según la mecánica cuántica, *no* está grabado en el presente; el universo, según la mecánica cuántica, participa en un juego de azar.

Aunque todavía hay controversia sobre cómo deben interpretarse precisamente estos desarrollos, la mayoría de los físicos están de acuerdo en que la probabilidad está profundamente entretejida en el tejido de la realidad cuántica. Mientras que la intuición humana, y su encarnación en la física clásica, imagina

una realidad en la que las cosas siempre están definitivamente de una manera *u* otra, la mecánica cuántica describe una realidad en la que las cosas a veces se ciernen en una neblina de ser en parte de una manera *y* en parte de otra. Las cosas se vuelven definitivas sólo cuando una observación adecuada las obliga a renunciar a las posibilidades cuánticas y a conformarse con un resultado específico. El resultado que se realiza, sin embargo, no se puede predecir, sólo podemos predecir las probabilidades de que las cosas resulten de una manera u otra.

Esto, hablando claramente, es raro. No estamos acostumbrados a una realidad que permanece ambigua hasta que se percibe. Pero la rareza de la mecánica cuántica no se detiene aquí. Al menos tan asombroso es un rasgo que se remonta a un artículo que Einstein escribió en 1935 con dos colegas más jóvenes, Nathan Rosen y Boris Podolsky, que pretendía ser un ataque a la teoría cuántica. [3] Con los consiguientes giros del progreso científico, el artículo de Einstein puede considerarse como uno de los primeros en señalar que la mecánica cuántica, si se toma al pie de la letra, implica que algo que se hace aquí puede vincularse *instantáneamente* con algo que ocurre allí, independientemente de la distancia. Einstein consideró ridículas tales conexiones instantáneas e interpretó su surgimiento de las matemáticas de la teoría cuántica como una prueba de que la teoría necesitaba mucho desarrollo antes de alcanzar una forma aceptable. Pero en el decenio de 1980, cuando tanto los avances teóricos como los tecnológicos llevaron el escrutinio experimental a estas supuestas absurdidades cuánticas, los investigadores confirmaron que *puede* haber un vínculo instantáneo entre lo que ocurre en lugares muy separados. En condiciones prístinas de laboratorio, lo que Einstein pensaba que era absurdo, realmente ocurre (Capítulo 4).

Las implicaciones de estas características de la mecánica cuántica para nuestra imagen de la realidad son un tema de investigación en curso. Muchos científicos, entre los que me incluyo, las ven como parte de una actualización cuántica radical del significado y las propiedades del espacio. Normalmente, la separación espacial implica independencia física. Si quieres controlar lo que ocurre al otro lado de un campo de fútbol, tienes que ir allí, o, al menos, tienes que enviar a alguien o algo (el entrenador asistente, moléculas de aire que rebotan y transmiten el habla, un destello de luz para llamar la atención de alguien, etc.) a través del campo para transmitir tu influencia. Si no lo haces, si permaneces aislado espacialmente, no tendrás ningún impacto, ya que el espacio intermedio asegura la ausencia de una conexión física. La mecánica cuántica desafía este punto de vista revelando, al menos en ciertas circunstancias, una capacidad de trascender el espacio; las conexiones cuánticas de largo alcance pueden evitar la separación espacial. Dos objetos pueden estar muy separados en el espacio, pero en lo que respecta a la mecánica cuántica, es como si fueran una sola entidad. Además, debido al estrecho vínculo entre el espacio y el tiempo encontrado por Einstein, las conexiones cuánticas también tienen tentáculos temporales. Pronto encontraremos algunos experimentos inteligentes y verdaderamente maravillosos

que han explorado recientemente un número de las sorprendentes interconexiones espacio-temporales que conlleva la mecánica cuántica y, como veremos, desafían enérgicamente la visión clásica e intuitiva del mundo que muchos de nosotros tenemos.

A pesar de estos muchos e impresionantes puntos de vista, queda una característica muy básica del tiempo, que parece tener una dirección que apunta desde el pasado hacia el futuro, para la cual ni la relatividad ni la mecánica cuántica han proporcionado una explicación. En cambio, el único progreso convincente ha venido de la investigación en un área de la física llamada cosmología.

La realidad cosmológica

Abrir los ojos a la verdadera naturaleza del universo siempre ha sido uno de los principales propósitos de la física. Es difícil imaginar una experiencia más alargada que aprender, como hemos hecho en el último siglo, que la realidad que experimentamos no es más que un atisbo de la realidad que es. Pero la física también tiene la carga igualmente importante de explicar los elementos de la realidad que realmente experimentamos. Desde nuestra rápida marcha a través de la historia de la física, podría parecer que esto ya se ha logrado, como si la experiencia ordinaria se abordara con los avances de la física anteriores al siglo XX. Hasta cierto punto, esto es cierto. Pero incluso cuando se trata de lo cotidiano, estamos lejos de una comprensión plena. Y entre los rasgos de la experiencia común que se han resistido a una explicación completa se encuentra uno que aprovecha uno de los más profundos misterios sin resolver de la física moderna: el misterio que el gran físico británico Sir Arthur Eddington llamó la flecha del tiempo.[4]

Damos por sentado que hay una dirección para la forma en que las cosas se desarrollan en el tiempo. Los huevos se rompen, pero no se rompen; las velas se derriten, pero no se deshacen; los recuerdos son del pasado, nunca del futuro; las personas envejecen, pero no se desangran. Estas asimetrías gobiernan nuestras vidas; la distinción entre adelante y atrás en el tiempo es un elemento predominante de la realidad experiencial. Si el avance y el retroceso en el tiempo exhibieran la misma simetría que presenciamos entre la izquierda y la derecha, o entre el avance y el retroceso, el mundo sería irreconocible. Los huevos se romperían tan a menudo como se rompieran; las velas se desharían tan a menudo como se derritieran; recordaríamos tanto el futuro como el pasado; las personas se desangrarían tan a menudo como envejecieran. Ciertamente, una realidad tan simétrica en el tiempo no es nuestra realidad. ¿Pero de dónde viene la asimetría del tiempo? ¿Qué es responsable de la más básica de todas las propiedades del tiempo?

Resulta que las leyes conocidas y aceptadas de la física no muestran tal asimetría (Capítulo 6): cada dirección en el tiempo, hacia adelante y hacia atrás, es tratada por las leyes sin distinción.*Y ese es el origen de un enorme rompecabezas.* Nada en las ecuaciones de la física fundamental muestra signos de tratar una dirección en el tiempo de manera diferente a la otra, y eso está totalmente en desacuerdo con todo lo que experimentamos. [5]

Sorprendentemente, aunque nos centramos en un rasgo familiar de la vida cotidiana, la resolución más convincente de este desajuste entre la física fundamental y la experiencia básica requiere que contemplemos el más desconocido de los acontecimientos: el comienzo del universo. Esta comprensión tiene sus raíces en el trabajo del gran físico del siglo XIX Ludwig Boltzmann, y en los años posteriores ha sido elaborada por muchos investigadores, en particular el matemático británico Roger Penrose. Como veremos, las condiciones físicas especiales en el inicio del universo (un entorno altamente ordenado en el momento del Big Bang o justo después) pueden haber impreso una dirección en el tiempo, más bien como dar cuerda a un reloj, girando su resorte en un estado inicial altamente ordenado, le permite avanzar. Por lo tanto, en un sentido que vamos a precisar, la rotura -en contraposición a la ruptura- de un huevo es testigo de las condiciones del nacimiento del universo hace unos 14.000 millones de años.

Este inesperado vínculo entre la experiencia cotidiana y el universo primitivo proporciona una visión de por qué los acontecimientos se desarrollan de una manera en el tiempo y nunca al revés, pero no resuelve completamente el misterio de la flecha del tiempo. En su lugar, traslada el rompecabezas al ámbito de la *cosmología* -el estudio del origen y la evolución de todo el cosmos- y nos obliga a averiguar si el universo tuvo realmente el comienzo tan ordenado que requiere esta explicación de la flecha del tiempo.

La cosmología es uno de los temas más antiguos que cautivan a nuestra especie. Y no es de extrañar. Somos narradores de historias, ¿y qué historia podría ser más grande que la de la creación? Durante los últimos milenios, las tradiciones religiosas y filosóficas en todo el mundo han pesado con una gran cantidad de versiones de cómo todo -el universo- comenzó. La ciencia, también, a lo largo de su larga historia, ha probado su mano en la cosmología. Pero fue el descubrimiento de Einstein de la relatividad general lo que marcó el nacimiento de la cosmología científica moderna.

Poco después de que Einstein publicara su teoría de la relatividad general, tanto él como otros la aplicaron al universo en su conjunto. En unas pocas décadas, su investigación condujo al marco tentativo de lo que ahora se llama la teoría del *big bang,* un enfoque que explicó con éxito muchas características de las observaciones astronómicas (Capítulo 8). A mediados de la década de 1960, las pruebas en apoyo de la cosmología del big bang aumentaron aún más, ya que las

observaciones revelaron una neblina casi uniforme de radiación de microondas que penetraba en el espacio -visible a simple vista pero fácilmente medible por los detectores de microondas- que fue predicha por la teoría. Y ciertamente para los años 70, después de una década de un escrutinio más profundo y un progreso sustancial en la determinación de cómo los ingredientes básicos del cosmos responden a los cambios extremos de calor y temperatura, la teoría del big bang se aseguró su lugar como la principal teoría cosmológica (Capítulo 9).

A pesar de sus éxitos, la teoría sufrió importantes deficiencias. Tuvo problemas para explicar por qué el espacio tiene la forma general revelada por las observaciones astronómicas detalladas, y no ofreció ninguna explicación de por qué la temperatura de la radiación de microondas, intensamente estudiada desde su descubrimiento, parece completamente uniforme en todo el cielo. Además, lo que es de interés primordial para la historia que estamos contando, la teoría del big bang no ofrecía ninguna razón convincente de por qué el universo podría haber estado muy ordenado cerca del principio, como lo requiere la explicación de la flecha del tiempo.

Estos y otros temas abiertos inspiraron un gran avance a finales de los 70 y principios de los 80, conocido como cosmología *inflacionaria* (Capítulo 10). La cosmología inflacionaria modifica la teoría del big bang insertando un estallido extremadamente breve de expansión asombrosamente rápida durante los primeros momentos del universo (en este enfoque, el tamaño del universo aumentó en un factor superior a un millón de billones de billones en menos de una millonésima de una trillonésima de una trillonésima de segundo). Como quedará claro, este estupendo crecimiento del joven universo contribuye en gran medida a llenar los huecos dejados por el modelo del big bang, a explicar la forma del espacio y la uniformidad de la radiación de microondas, y también a sugerir por qué el universo primitivo podría haber estado muy ordenado, proporcionando así un progreso significativo hacia la explicación tanto de las observaciones astronómicas como de la flecha del tiempo que todos experimentamos (Capítulo 11).

Sin embargo, a pesar de estos éxitos crecientes, durante dos décadas la cosmología inflacionaria ha estado albergando su propio secreto embarazoso. Como la teoría estándar del big bang que modificó, la cosmología inflacionaria se basa en las ecuaciones que Einstein descubrió con su teoría general de la relatividad. Aunque volúmenes de artículos de investigación atestiguan el poder de las ecuaciones de Einstein para describir con precisión objetos grandes y masivos, los físicos saben desde hace mucho tiempo que un análisis teórico preciso de objetos pequeños -como el universo observable cuando tenía sólo una fracción de segundo de antiguo- requiere el uso de la mecánica cuántica. El problema, sin embargo, es que cuando las ecuaciones de la relatividad general se mezclan con las de la mecánica cuántica, el resultado es desastroso. Las ecuaciones se descomponen por completo, y esto nos impide determinar cómo nació el universo

y si en su nacimiento se dieron las condiciones necesarias para explicar la flecha del tiempo.

No es exagerado describir esta situación como la pesadilla de un teórico: la ausencia de herramientas matemáticas con las que analizar un reino vital que está más allá de la accesibilidad experimental. Y como el espacio y el tiempo están tan profundamente entrelazados con este particular reino inaccesible -el origen del universo-, comprender el espacio y el tiempo nos exige encontrar ecuaciones que puedan hacer frente a las condiciones extremas de enorme densidad, energía y temperatura características de los primeros momentos del universo. Este es un objetivo absolutamente esencial, y uno que muchos físicos creen que requiere el desarrollo de la llamada teoría *unificada.*

La realidad unificada

En los últimos siglos, los físicos han tratado de consolidar nuestra comprensión del mundo natural demostrando que los fenómenos diversos y aparentemente distintos se rigen en realidad por un único conjunto de leyes físicas. Para Einstein, este objetivo de unificación, de explicar la más amplia gama de fenómenos con el menor número de principios físicos, se convirtió en una pasión para toda la vida. Con sus dos teorías de la relatividad, Einstein unió el espacio, el tiempo y la gravedad. Pero este éxito sólo le animó a pensar en grande. Soñaba con encontrar un marco único y global capaz de abarcar todas las leyes de la naturaleza; llamó a ese marco una *teoría unificada.* Aunque de vez en cuando se extendieron rumores de que Einstein había encontrado una teoría unificada, todas esas afirmaciones resultaron ser infundadas; el sueño de Einstein no se cumplió.

El enfoque de Einstein en una teoría unificada durante los últimos treinta años de su vida lo distanció de la corriente principal de la física. Muchos científicos más jóvenes vieron su búsqueda de la más grande de todas las teorías como los desvaríos de un gran hombre que, en sus últimos años, había tomado el camino equivocado. Pero en las décadas desde el fallecimiento de Einstein, un creciente número de físicos han emprendido su búsqueda inconclusa. Hoy en día, el desarrollo de una teoría unificada se encuentra entre los problemas más importantes de la física teórica.

Durante muchos años, los físicos encontraron que el obstáculo central para realizar una teoría unificada era el conflicto fundamental entre los dos grandes avances de la física del siglo XX: la relatividad general y la mecánica cuántica. Aunque estos dos marcos de trabajo se aplican típicamente en reinos muy diferentes -la relatividad general a cosas grandes como estrellas y galaxias, la mecánica cuántica a cosas pequeñas como moléculas y átomos- cada teoría afirma ser universal, para trabajar en todos los reinos. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, siempre que las teorías se utilizan en conjunto, sus

ecuaciones combinadas producen respuestas sin sentido. Por ejemplo, cuando se utiliza la mecánica cuántica con la relatividad general para calcular la probabilidad de que tenga lugar algún proceso que implique la gravedad, la respuesta que se encuentra a menudo no es algo así como una probabilidad del 24 por ciento o del 63 por ciento o del 91 por ciento; en cambio, de las matemáticas combinadas surge una probabilidad *infinita*. Eso no significa que la probabilidad sea tan alta que debas apostar todo tu dinero por ella, porque es una apuesta segura. Las probabilidades superiores al 100 por ciento no tienen sentido. Los cálculos que producen una probabilidad infinita simplemente muestran que las ecuaciones combinadas de la relatividad general y la mecánica cuántica se han vuelto locas.

Los científicos han sido conscientes de la tensión entre la relatividad general y la mecánica cuántica durante más de medio siglo, pero durante mucho tiempo relativamente pocos se sintieron obligados a buscar una resolución. En su lugar, la mayoría de los investigadores utilizaron la relatividad general únicamente para analizar objetos grandes y masivos, mientras que reservaron la mecánica cuántica únicamente para analizar objetos pequeños y ligeros, manteniendo cuidadosamente cada teoría a una distancia segura de la otra para que su hostilidad mutua se mantuviera a raya. A lo largo de los años, este enfoque de la distensión ha permitido avances sorprendentes en nuestra comprensión de cada dominio, pero no produce una paz duradera.

Muy pocos reinos -situaciones físicas extremas que son a la vez masivas y diminutas- caen directamente en la zona desmilitarizada, lo que requiere que se apliquen simultáneamente la relatividad general y la mecánica cuántica. El centro de un agujero negro, en el que una estrella entera ha sido aplastada por su propio peso hasta un punto minúsculo, y el big bang, en el que se imagina que todo el universo observable ha sido comprimido en una pepita mucho más pequeña que un solo átomo, proporcionan los dos ejemplos más familiares. Sin una unión exitosa entre la relatividad general y la mecánica cuántica, el fin del colapso de las estrellas y el origen del universo permanecerían para siempre misteriosos. Muchos científicos estaban dispuestos a dejar a un lado estos reinos, o al menos a aplazar el pensamiento sobre ellos hasta que se hubieran superado otros problemas más fáciles de resolver.

Pero algunos investigadores no podían esperar. Un conflicto en las leyes conocidas de la física significa un fracaso en la comprensión de una profunda verdad y eso fue suficiente para evitar que estos científicos descansaran tranquilos. Sin embargo, los que se sumergieron, encontraron las aguas profundas y las corrientes ásperas. Durante largos períodos de tiempo, la investigación hizo pocos progresos; las cosas parecían sombrías. Aún así, la tenacidad de aquellos que tenían la determinación de mantener el curso y el sueño de unir la relatividad general y la mecánica cuántica está siendo recompensada. Los científicos están ahora recorriendo los caminos trazados por esos exploradores y se acercan a una fusión armoniosa de las leyes de lo grande y lo pequeño. El enfoque que muchos

están de acuerdo en que es el principal contendiente es *la teoría de supercuerdas* (Capítulo 12).

Como veremos, la teoría de las supercuerdas comienza proponiendo una nueva respuesta a una vieja pregunta: ¿cuáles son los componentes más pequeños e indivisibles de la materia? Durante muchas décadas, la respuesta convencional ha sido que la materia está compuesta de partículas -electrones y quarks- que pueden ser modeladas como puntos indivisibles y que no tienen tamaño ni estructura interna. La teoría convencional afirma, y los experimentos confirman, que estas partículas se combinan de varias maneras para producir protones, neutrones y la amplia variedad de átomos y moléculas que componen todo lo que hemos encontrado. La teoría de las supercuerdas cuenta una historia diferente. No niega el papel clave que juegan los electrones, los quarks y las otras especies de partículas reveladas por los experimentos, pero afirma que estas partículas no son puntos. En cambio, según la teoría de las supercuerdas, cada partícula está compuesta por un diminuto filamento de energía, unos cien mil millones de billones de veces más pequeño que un solo núcleo atómico (mucho más pequeño de lo que podemos sondear actualmente), que tiene la forma de una pequeña cuerda. Y así como una cuerda de violín puede vibrar en diferentes patrones, cada uno de los cuales produce un tono musical diferente, los filamentos de la teoría de las supercuerdas también pueden vibrar en diferentes patrones. Estas vibraciones, sin embargo, no producen diferentes notas musicales; notablemente, la teoría afirma que producen diferentes propiedades de las partículas. Una diminuta cuerda que vibra en un patrón tendría la masa y la carga eléctrica de un electrón; según la teoría, tal cuerda vibrante *sería* lo que tradicionalmente hemos llamado un electrón. Una diminuta cuerda que vibra en un patrón diferente tendría las propiedades necesarias para identificarla como un quark, un neutrino o cualquier otro tipo de partícula. Todas las especies de partículas están unificadas en la teoría de las supercuerdas, ya que cada una surge de un patrón vibratorio diferente ejecutado por la misma entidad subyacente.

Pasar de los puntos a las cuerdas, tan pequeñas que parecen puntos, podría no parecer un cambio de perspectiva terriblemente significativo. Pero lo es. Desde tan humildes comienzos, la teoría de las supercuerdas combina la relatividad general y la mecánica cuántica en una única y consistente teoría, desterrando las perniciosas e infinitas probabilidades que afligen a las uniones previamente intentadas. Y como si esto no fuera suficiente, la teoría de las supercuerdas ha revelado la amplitud necesaria para unir todas las fuerzas de la naturaleza y toda la materia en el mismo tapiz teórico. En resumen, la teoría de supercuerdas es un candidato principal para la teoría unificada de Einstein.

Estas son grandes afirmaciones y, si son correctas, representan un monumental paso adelante. Pero la característica más sorprendente de la teoría de las supercuerdas, una que no dudo que habría puesto el corazón de Einstein en movimiento, es su profundo impacto en nuestra comprensión de la estructura del

cosmos. Como veremos, la fusión propuesta por la teoría de las supercuerdas de la relatividad general y la mecánica cuántica es matemáticamente sensata sólo si sometemos nuestra concepción del espacio-tiempo a otro trastorno. En lugar de las tres dimensiones espaciales y la dimensión temporal de la experiencia común, la teoría de las supercuerdas requiere *nueve* dimensiones espaciales y una dimensión temporal. Y, en una encarnación más robusta de la teoría de las supercuerdas conocida como teoría *M,* la unificación requiere *diez dimensiones espaciales y una dimensión temporal*, un sustrato cósmico compuesto por un total de once dimensiones espacio-temporales. Como no vemos estas dimensiones adicionales, la teoría de las supercuerdas nos dice que hasta ahora sólo *hemos* vislumbrado una *pequeña parte de la realidad.*

Por supuesto, la falta de pruebas de observación para las dimensiones adicionales también podría significar que no existen y que la teoría de las supercuerdas está equivocada. Sin embargo, sacar esa conclusión sería extremadamente precipitado. Incluso décadas antes del descubrimiento de la teoría de las supercuerdas, científicos visionarios, incluyendo a Einstein, ponderaron la idea de dimensiones espaciales más allá de las que vemos, y sugirieron posibilidades de dónde podrían estar escondidas. Los teóricos de las cuerdas han refinado sustancialmente estas ideas y han encontrado que las dimensiones adicionales podrían estar tan apretadas que son demasiado pequeñas para que las veamos nosotros o cualquiera de nuestros equipos existentes (Capítulo 12), o podrían ser grandes pero invisibles para las formas en que sondeamos el universo (Capítulo 13). Cualquiera de estos escenarios tiene profundas implicaciones. A través de su impacto en las vibraciones de las cuerdas, las formas geométricas de las diminutas dimensiones arrugadas podrían contener respuestas a algunas de las preguntas más básicas, como por qué nuestro universo tiene estrellas y planetas. Y el espacio que proporcionan las grandes dimensiones espaciales adicionales podría permitir algo aún más extraordinario: otros mundos cercanos, no cercanos en el espacio ordinario, sino cercanos en las dimensiones adicionales, de los que hasta ahora hemos sido completamente inconscientes.

Aunque es una idea atrevida, la existencia de dimensiones adicionales no es sólo un pastel teórico en el cielo. Puede que en breve sea comprobable. Si existen, las dimensiones adicionales pueden conducir a resultados espectaculares con la próxima generación de rompedores de átomos, como la primera síntesis humana de un agujero negro microscópico, o la producción de una enorme variedad de nuevas especies de partículas nunca antes descubiertas (Capítulo 13). Estos y otros resultados exóticos pueden proporcionar la primera evidencia de dimensiones más allá de las directamente visibles, llevándonos un paso más cerca de establecer la teoría de supercuerdas como la tan buscada teoría unificada.

Si se demuestra que la teoría de las supercuerdas es correcta, nos veremos obligados a aceptar que la realidad que hemos conocido no es más que una delicada gasa envuelta en un grueso y rico tejido cósmico. A pesar de la

declaración de Camus, la determinación del número de dimensiones del espacio y, en particular, el descubrimiento de que no son sólo tres, proporcionaría mucho más que un detalle científicamente interesante pero en última instancia intrascendente. El descubrimiento de dimensiones adicionales demostraría que la totalidad de la experiencia humana nos ha dejado completamente inconscientes de un aspecto básico y esencial del universo. Argumentaría enérgicamente que incluso aquellos rasgos del cosmos que hemos pensado que son fácilmente accesibles a los sentidos humanos no tienen por qué serlo.

Realidad del pasado y del futuro

Con el desarrollo de la teoría de supercuerdas, los investigadores son optimistas en que finalmente tenemos un marco que no se romperá bajo ninguna condición, no importa cuán extrema sea, permitiéndonos un día mirar hacia atrás con nuestras ecuaciones y aprender cómo eran las cosas en el mismo momento en que el universo tal como lo conocemos comenzó. Hasta la fecha, nadie ha adquirido suficiente destreza con la teoría para aplicarla inequívocamente al big bang, pero entender la cosmología según la teoría de las supercuerdas se ha convertido en una de las mayores prioridades de la investigación actual. En los últimos años, vigorosos programas de investigación mundial en cosmología de supercuerdas han dado lugar a novedosos marcos cosmológicos (Capítulo 13), han sugerido nuevas formas de probar la teoría de supercuerdas utilizando observaciones astrofísicas (Capítulo 14), y han proporcionado algunos de los primeros conocimientos sobre el papel que la teoría puede desempeñar en la explicación de la flecha del tiempo.

La flecha del tiempo, a través del papel definitorio que juega en la vida cotidiana y su íntimo vínculo con el origen del universo, se encuentra en un singular umbral entre la realidad que experimentamos y la realidad más refinada que la ciencia de vanguardia busca descubrir. Como tal, la cuestión de la flecha del tiempo proporciona un hilo común que atraviesa muchos de los desarrollos que discutiremos, y saldrá a la superficie repetidamente en los capítulos que siguen. Esto es apropiado. De los muchos factores que dan forma a las vidas que llevamos, el tiempo es uno de los más dominantes. A medida que continuamos ganando facilidad con la teoría de las supercuerdas y su extensión, la teoría M, nuestro conocimiento cosmológico se profundizará, enfocando cada vez más el origen del tiempo y su flecha. Si dejamos volar nuestra imaginación, podemos incluso imaginar que la profundidad de nuestra comprensión nos permitirá algún día navegar por el espacio tiempo y, por lo tanto, explorar reinos que, hasta este punto de nuestra experiencia, siguen estando muy por encima de nuestra capacidad de acceso (capítulo 15).

Por supuesto, es extremadamente improbable que alguna vez logremos tal poder. Pero incluso si nunca obtenemos la capacidad de controlar el espacio y el tiempo, la comprensión profunda produce su propio poder. Nuestra comprensión de la verdadera naturaleza del espacio y el tiempo sería un testimonio de la capacidad del intelecto humano. Finalmente llegaríamos a conocer el espacio y el tiempo, los silenciosos y siempre presentes marcadores que delinean los límites más remotos de la experiencia humana.

La mayoría de edad en el espacio y el tiempo

Cuando pasé la última página de *El mito de Sísifo* hace muchos años, me sorprendió que el texto haya logrado un sentimiento de optimismo general. Después de todo, un hombre condenado a empujar una roca por una colina con el pleno conocimiento de que volverá a rodar hacia abajo, requiriendo que empiece a empujar de nuevo, no es el tipo de historia que se esperaría que tuviera un final feliz. Sin embargo, Camus encontró mucha esperanza en la capacidad de Sísifo para ejercer el libre albedrío, para seguir adelante contra los obstáculos insuperables y para afirmar su elección de sobrevivir incluso cuando estaba condenado a una tarea absurda dentro de un universo indiferente. Renunciando a todo lo que está más allá de la experiencia inmediata, y dejando de buscar cualquier tipo de comprensión o significado más profundo, Sísifo, argumentaba Camus, triunfa.

Me impresionó la habilidad de Camus para discernir la esperanza donde la mayoría de los demás sólo verían desesperación. Pero cuando era adolescente, y sólo más en las décadas siguientes, descubrí que no podía aceptar la afirmación de Camus de que una comprensión más profunda del universo no haría que la vida fuera más rica o valiera la pena. Mientras que Sísifo era el héroe de Camus, el más grande de los científicos - Newton, Einstein, Niels Bohr y Richard Feynman - se convirtió en el mío. Y cuando leí la descripción de Feynman de una rosa, en la que explicaba cómo podía experimentar la fragancia y la belleza de la flor tan plenamente como cualquiera, pero cómo su conocimiento de la física enriqueció enormemente la experiencia porque también podía captar la maravilla y la magnificencia de los procesos moleculares, atómicos y subatómicos subyacentes, quedé enganchado para siempre. Quería lo que Feynman describió: evaluar la vida y experimentar el universo en todos los niveles posibles, no sólo en aquellos que resultaban accesibles a nuestros frágiles sentidos humanos. La búsqueda de la comprensión más profunda del cosmos se convirtió en mi sangre vital.

Como físico profesional, hace tiempo que me di cuenta de que había mucha ingenuidad en mi encaprichamiento por la física en la escuela secundaria. Los físicos generalmente no pasan sus días de trabajo contemplando flores en un estado de asombro cósmico. En cambio, dedicamos mucho de nuestro tiempo a

lidiar con complejas ecuaciones matemáticas garabateadas en pizarras bien marcadas. El progreso puede ser lento. Las ideas prometedoras, la mayoría de las veces, no llevan a ninguna parte. Esa es la naturaleza de la investigación científica. Sin embargo, incluso durante los períodos de mínimo progreso, he descubierto que el esfuerzo dedicado a desconcertar y calcular sólo me ha hecho sentir una conexión más estrecha con el cosmos. He descubierto que se puede llegar a conocer el universo no sólo resolviendo sus misterios, sino también sumergiéndose en ellos. Las respuestas son geniales. Las respuestas confirmadas por el experimento son aún mayores. Pero incluso las respuestas que finalmente se prueban erróneas representan el resultado de un profundo compromiso con el cosmos, un compromiso que arroja una intensa iluminación sobre las preguntas, y por lo tanto sobre el propio universo. Incluso cuando la roca asociada con una exploración científica particular vuelve a su punto de partida, aprendemos algo y nuestra experiencia del cosmos se enriquece.

Por supuesto, la historia de la ciencia revela que la roca de nuestra investigación científica colectiva -con contribuciones de innumerables científicos de todos los continentes y a través de los siglos- no rueda por la montaña. A diferencia de Sísifo, no empezamos de cero. Cada generación toma el relevo de la anterior, rinde homenaje al trabajo duro, la perspicacia y la creatividad de sus predecesores, y avanza un poco más. Nuevas teorías y medidas más refinadas son la marca del progreso científico, y tal progreso se basa en lo que vino antes, casi nunca borrando la pizarra. Porque este es el caso, nuestra tarea está lejos de ser absurda o inútil. Al empujar la roca hacia la montaña, emprendemos la más exquisita y noble de las tareas: descubrir este lugar que llamamos hogar, deleitarnos con las maravillas que descubrimos y entregar nuestro conocimiento a los que le siguen.

Para una especie que, por escalas de tiempo cósmicas, acaba de aprender a caminar erguida, los desafíos son asombrosos. Sin embargo, en los últimos trescientos años, a medida que hemos pasado de la realidad clásica a la relativista y luego a la cuántica, y ahora hemos pasado a las exploraciones de la realidad unificada, nuestras mentes e instrumentos se han extendido por la gran extensión del espacio y el tiempo, acercándonos más que nunca a un mundo que ha demostrado ser un hábil maestro del disfraz.

Y a medida que hemos continuado desenmascarando lentamente el cosmos, hemos ganado la intimidad que sólo se obtiene al acercarnos a la claridad de la verdad. Las exploraciones tienen mucho camino por recorrer, pero para muchos es como si nuestra especie finalmente llegara al final de la infancia.

Para estar seguros, nuestra mayoría de edad aquí en las afueras de la Vía Láctea [6] ha sido un largo tiempo de preparación. De una forma u otra, hemos estado explorando nuestro mundo y contemplando el cosmos durante miles de años. Pero la mayor parte de ese tiempo sólo hicimos breves incursiones en lo desconocido, cada vez regresando a casa algo más sabio pero en gran parte sin cambios. Se necesitó el descaro de un Newton para plantar la bandera de la investigación científica moderna y no volver nunca más. Desde entonces, hemos estado subiendo más alto. Y todos nuestros viajes comenzaron con una simple pregunta.

¿Qué es el espacio?

2 - El universo y el cubo

¿EL ESPACIO ES UNA ABSTRACCIÓN HUMANA O UNA ENTIDAD FÍSICA?

No es frecuente que un cubo de agua sea el personaje central de un debate de trescientos años de duración. Pero un cubo que perteneció a Sir Isaac Newton no es un cubo ordinario, y un pequeño experimento que describió en 1689 ha influido profundamente en algunos de los más grandes físicos del mundo desde entonces. El experimento es este: Tomar un cubo lleno de agua, colgarlo de una cuerda, girar la cuerda con fuerza para que esté lista para desenrollarse, y dejarlo ir. Al principio, el cubo comienza a girar pero el agua en su interior permanece bastante estacionaria; la superficie del agua estacionaria permanece agradable y plana. A medida que el cubo coge velocidad, poco a poco su movimiento se comunica al agua por fricción, y el agua comienza a girar también. A medida que lo hace, la superficie del agua adquiere una forma cóncava, más alta en el borde y más baja en el centro, como en la figura 2.1.

Ese es el experimento, no es algo que haga que el corazón se acelere. Pero un pequeño pensamiento mostrará que este cubo de agua giratorio es extremadamente desconcertante. Y llegar a entenderlo, como no lo hemos hecho en más de tres siglos, es uno de los pasos más importantes para entender la estructura del universo. Entender el porqué requerirá algunos antecedentes, pero vale la pena el esfuerzo.



Figura 2.1 La superficie del agua comienza plana y permanece así cuando el cubo comienza a girar. Posteriormente, a medida que el agua también comienza a girar, su superficie se vuelve cóncava, y permanece cóncava mientras el agua gira, incluso cuando el cubo disminuye su velocidad y se detiene.

La relatividad antes de Einstein

"Relatividad" es una palabra que asociamos con Einstein, pero el concepto va mucho más atrás. Galileo, Newton y muchos otros sabían que*la velocidad,* la velocidad y la dirección del movimiento de un objeto, es relativa. En términos modernos, desde el punto de vista del bateador, una bola rápida bien lanzada podría estar acercándose a 100 millas por hora. Desde el punto de vista del béisbol, es el *bateador* el que se acerca a 100 millas por hora. Ambas descripciones son exactas; es sólo una cuestión de perspectiva. El movimiento tiene significado sólo en un sentido relacional: La velocidad de un objeto puede especificarse sólo en relación con la de otro objeto. Probablemente has experimentado esto. Cuando el tren en el que estás está al lado de otro y ves un movimiento relativo, no puedes decir inmediatamente qué tren se está moviendo realmente en las vías. Galileo describió este efecto usando el transporte de su época, los barcos. Si dejas caer una moneda en un barco que navega sin problemas, dijo Galileo, te golpeará el pie como lo haría en tierra firme. Desde su perspectiva, está justificado que declare que está parado y es el agua que se precipita por el casco del barco. Y como desde este punto de vista no te estás moviendo, el movimiento de la moneda en relación a tu pie será exactamente lo que habría sido antes de que te embarcaras.

Por supuesto, hay circunstancias en las que tu movimiento parece intrínseco, cuando puedes sentirlo y pareces capaz de declarar, sin recurrir a comparaciones externas, que te estás moviendo definitivamente. Este es el caso del movimiento *acelerado*, movimiento en el que tu velocidad y/o tu dirección cambian. Si el barco en el que estás se tambalea de repente de una forma u otra, o reduce la velocidad o acelera, o cambia de dirección al doblar una curva, o se ve atrapado en un remolino y da vueltas y vueltas, sabes que te estás moviendo. Y te das cuenta de esto sin mirar hacia afuera y comparar tu movimiento con algún punto de referencia elegido. Incluso si tus ojos están cerrados, sabes que te estás

moviendo, porque lo sientes. Por lo tanto, aunque no puedes sentir el movimiento con una velocidad constante que se dirige en una trayectoria recta invariable *-se* llama movimiento de *velocidad constante*- puedes sentir *los cambios* en tu velocidad.

Pero si lo piensas un momento, hay algo extraño en esto. ¿Qué tienen los cambios de velocidad que les permite estar solos, tener un significado intrínseco? Si la velocidad es algo que tiene sentido sólo por comparaciones - diciendo que *esto se mueve* con respecto a *eso*- ¿cómo es que los cambios de velocidad son de alguna manera diferentes, y no requieren también comparaciones para darles significado? De hecho, ¿podría ser que en realidad *sí* requieren que se haga una comparación? ¿Podría ser que haya alguna comparación implícita u oculta que realmente funcione cada vez que nos referimos o experimentamos un movimiento acelerado? Esta es una pregunta central a la que nos dirigimos porque, quizás sorprendentemente, toca los temas más profundos que rodean el significado del espacio y el tiempo.

Las ideas de Galileo sobre el movimiento, sobre todo su afirmación de que la tierra se mueve, le provocó la ira de la Inquisición. Un Descartes más cauteloso, en sus *Principia Philosophiae, trató de* evitar un destino similar y expresó su comprensión del movimiento en un marco equívoco que no podía soportar el escrutinio cercano que Newton le dio unos treinta años más tarde. Descartes hablaba de la resistencia de los objetos a los cambios de su estado de movimiento: algo que está inmóvil permanecerá inmóvil a menos que alguien o algo lo obligue a moverse; algo que se mueve en línea recta a una velocidad constante mantendrá ese movimiento hasta que alguien o algo lo obligue a cambiar. Pero, ¿qué significan realmente estas nociones de "inmóvil" o "línea recta a velocidad constante"? ¿Inmóvil o velocidad constante con respecto a qué? ¿Inmóvil o velocidad constante desde el punto de vista de quién? Si la velocidad no es constante, ¿con respecto a qué o desde el punto de vista de quién no es constante? Descartes correctamente sacó aspectos del significado del movimiento, pero Newton se dio cuenta de que dejó preguntas clave sin responder.

Newton -un hombre tan impulsado por la búsqueda de la verdad que una vez se metió una aguja desafilada entre el ojo y el hueso de la cuenca para estudiar la anatomía ocular y, más tarde en su vida como Maestro de la Moneda, aplicó el más duro de los castigos a los falsificadores, enviando a más de un centenar a la horca- no toleraba los razonamientos falsos o incompletos. Así que decidió dejar las cosas claras. Esto lo llevó a introducir el cubo. [1]

El cubo

Cuando dejamos el cubo, tanto él como el agua que había dentro estaban girando, con la superficie del agua formando una forma cóncava. La cuestión que Newton planteó es, ¿por *qué* la superficie del agua toma esta forma? Bueno, porque está girando, dices, y al igual que nos sentimos presionados contra el lateral de un coche cuando da una curva cerrada, el agua se presiona contra el lateral del cubo mientras gira. Y el único lugar para que el agua presionada vaya hacia arriba. Este razonamiento es sólido, en lo que a esto respecta, pero se pierde la verdadera intención de la pregunta de Newton. Quería saber qué *significa* decir que el agua está girando: ¿girando con respecto a qué? Newton estaba luchando con la base misma del movimiento y no estaba preparado para aceptar que el movimiento acelerado, como el giro, está de alguna manera más allá de la necesidad de comparaciones externas. [1]

Una sugerencia natural es utilizar el propio cubo como objeto de referencia. Sin embargo, como argumentó Newton, esto falla. Verán, al principio cuando dejamos que el cubo empiece a girar, definitivamente hay un movimiento *relativo* entre el cubo y el agua, porque el agua no se mueve inmediatamente. Aún así, la superficie del agua se mantiene plana. Luego, un poco más tarde, cuando el agua está girando y*no hay* movimiento relativo entre el cubo y el agua, la superficie del agua *es cóncava*. Así que, con el cubo como objeto de referencia, obtenemos exactamente lo contrario de lo que esperamos: cuando hay movimiento relativo, la superficie del agua es plana; y cuando no hay movimiento relativo, la superficie es cóncava.

De hecho, podemos llevar el experimento del cubo de Newton un pequeño paso más allá. A medida que el cubo continúa girando, la cuerda se torcerá de nuevo (en la otra dirección), causando que el cubo disminuya su velocidad y se detenga momentáneamente, mientras el agua en su interior continúa girando. En este punto, el movimiento relativo entre el agua y el cubo es el *mismo* que se produjo cerca del comienzo del experimento (excepto por la diferencia intrascendente del movimiento en el sentido de las agujas del reloj frente al contrario), pero la forma de la superficie del agua es *diferente* (antes era plana, ahora es cóncava); esto demuestra de manera concluyente que el movimiento relativo no puede explicar la forma de la superficie.

Habiendo descartado el cubo como una referencia relevante para el movimiento del agua, Newton audazmente dio el siguiente paso. Imagine, sugirió, otra versión del experimento del cubo giratorio llevado a cabo en un espacio profundo, frío y completamente vacío. No podemos realizar exactamente el mismo experimento, ya que la forma de la superficie del agua dependía en parte de la atracción de la gravedad de la Tierra, y en esta versión la Tierra está ausente. Así que, para crear un ejemplo más factible, imaginemos que tenemos un enorme cubo, uno tan grande como cualquier parque de atracciones, que está flotando en la oscuridad del espacio vacío, e imaginemos que un intrépido astronauta, Homero, está atado a la pared interior del cubo. (Newton no usó este ejemplo en realidad; sugirió usar

dos rocas atadas con una cuerda, pero el punto es el mismo). La señal reveladora de que el cubo está girando, el análogo de que el agua es empujada hacia afuera dando una superficie cóncava, es que Homero se *sentirá* presionado contra el interior del cubo, su piel facial tensándose, su estómago comprimiéndose ligeramente, y su pelo (ambas hebras) estirándose hacia la pared del cubo. Esta es la pregunta: en un espacio *totalmente* vacío -sin sol, sin tierra, sin aire, sin rosquillas, sin nada- ¿qué podría servir como el "algo" con respecto al cual el cubo está girando? Al principio, ya que estamos imaginando que el espacio está completamente vacío excepto por el cubo y su contenido, parece como si simplemente no hubiera nada más que sirviera como el "algo". Newton no estaba de acuerdo.

Respondió fijándose en el último contenedor como marco de referencia relevante: *el propio espacio.* Propuso que la arena transparente y vacía en la que todos estamos inmersos y dentro de la cual tiene lugar todo el movimiento existe como una entidad física real, a la que llamó espacio absoluto. [2] No podemos agarrar o agarrar el espacio absoluto, no podemos saborear u oler u oír el espacio absoluto, pero sin embargo Newton declaró que el espacio absoluto es un algo. Es el algo, propuso, que proporciona la referencia más verdadera para describir el movimiento. Un objeto está realmente en reposo cuando está en reposo con respecto al espacio absoluto. Un objeto se mueve verdaderamente cuando se mueve con respecto al espacio absoluto. Y, lo más importante, Newton concluyó, un objeto está realmente acelerando cuando está acelerando con respecto al espacio absoluto.

Newton utilizó esta propuesta para explicar el experimento del cubo terrestre de la siguiente manera. Al principio del experimento, el cubo está girando con respecto al espacio absoluto, pero el agua está estacionaria con respecto al espacio absoluto. Por eso la superficie del agua es plana. A medida que el agua alcanza el cubo, ahora está girando con respecto al espacio absoluto, y por eso su superficie se vuelve cóncava. A medida que el cubo se ralentiza debido a la cuerda de sujeción, el agua sigue girando con respecto al espacio absoluto, y por eso su superficie sigue siendo cóncava. Y así, mientras que el movimiento relativo entre el agua y el cubo no puede dar cuenta de las observaciones, el movimiento relativo entre el agua y el espacio absoluto sí puede. El espacio en sí mismo proporciona el verdadero marco de referencia para definir el movimiento.

El cubo no es más que un ejemplo; el razonamiento es, por supuesto, mucho más general. Según la perspectiva de Newton, cuando tomas una curva en un coche, sientes el cambio de velocidad porque estás acelerando con respecto al espacio absoluto. Cuando el avión en el que estás se está preparando para despegar, te sientes presionado en tu asiento porque estás acelerando con respecto al espacio absoluto. Cuando giras sobre patines de hielo, sientes que tus brazos son lanzados hacia afuera porque estás acelerando con respecto al espacio absoluto. Por el contrario, si alguien fuera capaz de hacer girar toda la pista de hielo

mientras tú estás quieto (suponiendo la situación idealizada de los patines sin fricción) -dando lugar al mismo movimiento relativo entre tú y el hielo- no sentirías que tus brazos se lanzan hacia fuera, porque no estarías acelerando con respecto al espacio absoluto. Y, sólo para asegurarnos de que no nos desviamos por los detalles irrelevantes de los ejemplos que utilizan el cuerpo humano, cuando las dos rocas de Newton atadas por una cuerda giran en el espacio vacío, la cuerda se tensa porque las rocas se están acelerando con respecto al espacio absoluto. El espacio absoluto tiene la última palabra sobre lo que significa moverse.

¿Pero qué es el espacio absoluto, en realidad? Al tratar esta pregunta, Newton respondió con un poco de juego de piernas elegante y la fuerza de la fe. Escribió primero en los *Principios* "No defino el tiempo, el espacio, el lugar y el movimiento, ya que [son] bien conocidos por todos", [3] eludiendo cualquier intento de describir estos conceptos con rigor o precisión. Sus siguientes palabras se han hecho famosas: "El espacio absoluto, en su propia naturaleza, sin referencia a nada externo, permanece siempre similar e inamovible". Es decir, el espacio absoluto sólo es, y es para siempre. Punto. Pero hay destellos de que Newton no estaba completamente cómodo con la simple declaración de la existencia e importancia de algo que no se puede ver, medir o afectar directamente. Él escribió,

En efecto, es muy difícil descubrir y distinguir eficazmente los verdaderos movimientos de los cuerpos particulares de los aparentes, porque las partes de ese espacio inamovible en las que se realizan esos movimientos no entran en absoluto en las observaciones de nuestros sentidos.[4]

Así que Newton nos deja en una posición algo incómoda. Pone el espacio absoluto al frente y en el centro de la descripción del elemento más básico y esencial de la física - el movimiento - pero deja su definición vaga y reconoce su propia incomodidad por colocar un huevo tan importante en una cesta tan evasiva. Muchos otros han compartido esta incomodidad.

Jamón espacial

Einstein dijo una vez que si alguien usa palabras como "rojo", "duro" o "decepcionado", todos sabemos básicamente lo que significa. Pero en cuanto a la palabra "espacio", "cuya relación con la experiencia psicológica es menos directa, existe una gran incertidumbre de interpretación". [5] Esta incertidumbre se remonta muy atrás: la lucha por comprender el significado del espacio es muy antigua. Demócrito, Epicuro, Lucrecio, Pitágoras, Platón, Aristóteles y muchos de sus seguidores a través de los tiempos lucharon de una forma u otra con el significado de "espacio". ¿Hay alguna diferencia entre el espacio y la materia? ¿Tiene el espacio una existencia independiente de la presencia de objetos materiales? ¿Existe el espacio vacío? ¿Se excluyen mutuamente el espacio y la materia? ¿Es el espacio finito o infinito?

Durante milenios, los análisis filosóficos del espacio a menudo surgieron en conjunto con las investigaciones teológicas. Dios, según algunos, es omnipresente, una idea que da al espacio un carácter divino. Esta línea de razonamiento fue avanzada por Henry More, un teólogo/filósofo del siglo XVII que, algunos piensan, puede haber sido uno de los mentores de Newton.[6] Él creía que si el espacio estuviera vacío no existiría, pero también argumentaba que esta es una observación irrelevante porque, incluso cuando está desprovisto de objetos materiales, el espacio está lleno de espíritu, por lo que *nunca* está realmente vacío. El propio Newton tomó una versión de esta idea, permitiendo que el espacio se llenara tanto de "sustancia espiritual" como de sustancia material, pero tuvo cuidado de añadir que tales cosas espirituales "no pueden ser un obstáculo para el movimiento de la materia; no más que si nada se interpusiera en su camino". [7] El espacio absoluto, declaró Newton, es el sensorio de Dios.

Tales reflexiones filosóficas y religiosas sobre el espacio pueden ser convincentes y provocativas, pero, como en el comentario cautelar de Einstein, carecen de una agudeza crítica de descripción. Pero *hay*una cuestión fundamental y precisamente enmarcada que surge de ese discurso: ¿debemos atribuir una realidad independiente al espacio, como hacemos con otros objetos materiales más ordinarios como el libro que usted tiene en sus manos, o debemos pensar en el espacio como un mero lenguaje para describir las relaciones entre los objetos materiales ordinarios?

El gran filósofo alemán Gottfried Wilhelm von Leibniz, contemporáneo de Newton, creía firmemente que el espacio no existe en ningún sentido convencional. Hablar de espacio, afirmaba, no es más que una forma fácil y conveniente de codificar donde las cosas están relacionadas unas con otras. Sin los objetos *en* el espacio, declaró Leibniz, el espacio en sí mismo no tiene un significado o existencia independiente. Piense en el alfabeto inglés. Proporciona un orden de veintiséis letras. Proporciona relaciones como la *a* está al lado de la *b, la d es* seis letras antes de *la j, la x* es tres letras después de *la u,* y así sucesivamente. Pero sin las letras, el alfabeto no tiene significado, no tiene "supercarta", existencia independiente. En su lugar, el alfabeto nace con las letras cuyas relaciones lexicográficas proporciona. Leibniz afirmaba que lo mismo ocurría con el espacio: El espacio no tiene ningún significado más allá de proporcionar el lenguaje natural para discutir la relación entre la ubicación de un objeto y otro. Según Leibniz, si todos los objetos fueran retirados del espacio, si el espacio estuviera completamente vacío, no tendría sentido como un alfabeto al que le faltan las letras.

Leibniz presentó una serie de argumentos en apoyo de esta posición llamada *relativista*. Por ejemplo, argumentó que si el espacio existe realmente como una entidad, como una sustancia de fondo, Dios habría tenido que elegir en qué lugar de esta sustancia ubicar el universo. Pero ¿cómo podría Dios, cuyas decisiones tienen todas una justificación sólida y nunca son aleatorias o fortuitas, haber

distinguido posiblemente una ubicación en el vacío uniforme del espacio vacío de otra, ya que todas son iguales? Para el oído científicamente receptivo, este argumento suena muy poco convincente. Sin embargo, si eliminamos el elemento teológico, como hizo el propio Leibniz en otros argumentos que presentó, nos quedamos con cuestiones espinosas: ¿Cuál es la ubicación del universo en el espacio? Si el universo se moviera como un todo, dejando intactas todas las posiciones relativas de los objetos materiales, a diez pies a la izquierda o a la derecha, ¿cómo lo sabríamos? ¿Cuál es la velocidad de todo el universo a través de la sustancia del espacio? Si somos fundamentalmente incapaces de detectar el espacio, o los cambios dentro del espacio, ¿cómo podemos afirmar que realmente existe?

Es aquí donde Newton intervino con su cubo y cambió dramáticamente el carácter del debate. Aunque Newton estuvo de acuerdo en que ciertas características del espacio absoluto parecen difíciles o tal vez imposibles de detectar directamente, argumentó que la existencia del espacio absoluto tiene consecuencias que son observables: las aceleraciones, como las que se producen en el cubo giratorio, son aceleraciones con respecto al espacio absoluto. Así pues, la forma cóncava del agua, según Newton, es una consecuencia de la existencia del espacio absoluto. Y Newton argumentó que una vez que uno tiene alguna evidencia sólida de la existencia de algo, no importa cuán indirecta, eso termina la discusión. En un inteligente golpe, Newton cambió el debate sobre el espacio de las reflexiones filosóficas a los datos científicamente verificables. El efecto fue palpable. A su debido tiempo, Leibniz se vio obligado a admitir: "Reconozco que hay una diferencia entre el verdadero movimiento absoluto de un cuerpo y un mero cambio relativo de su situación con respecto a otro cuerpo".[8] Esto no fue una capitulación al espacio absoluto de Newton, pero fue un fuerte golpe a la firme posición relacionista.

Durante los siguientes doscientos años, los argumentos de Leibniz y otros contra la asignación del espacio como una realidad independiente apenas tuvieron eco en la comunidad científica.[9] En su lugar, el péndulo había oscilado claramente hacia la visión de Newton del espacio; sus leyes de movimiento, fundadas en su concepto de espacio absoluto, tomaron el centro del escenario. Ciertamente, el éxito de estas leyes en la descripción de las observaciones fue la razón esencial para su aceptación. Es sorprendente notar, sin embargo, que el propio Newton veía todos sus logros en la física como una mera base sólida para apoyar lo que consideraba su descubrimiento más importante: el espacio absoluto. Para Newton, todo se trataba del espacio.[10]

Mach y el significado del espacio

Cuando era niño, solía jugar con mi padre mientras caminábamos por las calles de Manhattan. Uno de nosotros miraba a su alrededor, fijándose secretamente en algo que estaba pasando -un autobús que pasaba corriendo, una paloma que caía en el alféizar de una ventana, un hombre que dejaba caer accidentalmente una moneda- y describía cómo se vería desde una perspectiva inusual como la rueda del autobús, la paloma en vuelo o el cuarto cayendo a tierra. El desafío consistía en tomar una descripción poco familiar como "Estoy caminando sobre una superficie oscura y cilíndrica rodeada de paredes bajas y texturizadas, y un grupo rebelde de gruesos zarcillos blancos está descendiendo del cielo", y descubrir que era la vista de una hormiga caminando sobre un perro caliente que un vendedor ambulante estaba adornando con chucrut. Aunque dejamos de jugar años antes de que tomara mi primer curso de física, el juego tiene al menos parte de la culpa de que yo tuviera bastante angustia cuando me encontré con las leyes de Newton.

El juego animaba a ver el mundo desde diferentes puntos de vista y enfatizaba que cada uno era tan válido como cualquier otro. Pero de acuerdo con Newton, aunque ciertamente eres libre de contemplar el mundo desde cualquier perspectiva que elijas, las diferentes posiciones ventajosas no están en absoluto en igualdad de condiciones. Desde el punto de vista de una hormiga en la bota de un patinador sobre hielo, son el hielo y la arena los que giran; desde el punto de vista de un espectador en las gradas, es el patinador sobre hielo el que gira. Los dos puntos de vista parecen ser igualmente válidos, parecen estar en igualdad de condiciones, parecen estar en la relación simétrica de cada uno de ellos girando con respecto al otro. Sin embargo, según Newton, una de estas perspectivas es más correcta que la otra ya que si *realmente* es el patinador de hielo el que gira, sus brazos se extenderán hacia afuera, mientras que si *realmente* es la arena la que gira, sus brazos no lo harán. Aceptar el espacio absoluto de Newton significaba aceptar una concepción absoluta de la aceleración y, en particular, aceptar una respuesta absoluta respecto a quién o qué es lo que realmente está girando. Luché por entender cómo podría ser esto cierto. Todas las fuentes que consulté -tanto libros de texto como profesores- coincidían en que sólo el movimiento relativo tenía relevancia cuando se consideraba el movimiento de velocidad constante, así que ¿por qué en el mundo, me desconcertaba sin cesar, el movimiento acelerado sería tan diferente? ¿Por qué la aceleración *relativa*, al igual que la velocidad relativa, no es lo único relevante cuando se considera el movimiento a una velocidad que no es constante? La existencia del espacio absoluto decretaba lo contrario, pero a mí me parecía muy peculiar.

Mucho más tarde aprendí que durante los últimos cientos de años muchos físicos y filósofos -a veces en voz alta, a veces en voz baja- habían luchado con el mismo tema. Aunque el cubo de Newton parecía mostrar definitivamente que el espacio absoluto es lo que selecciona una perspectiva sobre otra (si alguien o algo está girando con respecto al espacio absoluto entonces *realmente está girando*; de lo contrario no lo está), esta resolución dejó insatisfechas a muchas personas que reflexionan sobre estos temas. Más allá del sentido intuitivo de que ninguna

perspectiva debería ser "más correcta" que otra, y más allá de la propuesta eminentemente razonable de Leibniz de que sólo el movimiento relativo entre objetos materiales tiene sentido, el concepto de espacio absoluto dejó a muchos preguntándose cómo el espacio absoluto puede permitirnos identificar el verdadero movimiento acelerado, como con el cubo, mientras que no puede proporcionar una forma de identificar el verdadero movimiento de velocidad constante. Después de todo, si el espacio absoluto existe realmente, debería proporcionar un punto de referencia para *todo el movimiento*, no sólo el movimiento acelerado. Si el espacio absoluto realmente existe, ¿por qué no proporciona una forma de identificar dónde estamos ubicados en un sentido absoluto, uno que no necesite usar nuestra posición relativa a otros objetos materiales como punto de referencia? Y, si el espacio absoluto existe realmente, ¿cómo es que puede afectarnos (haciendo que nuestros brazos se separen si giramos, por ejemplo) mientras que aparentemente no tenemos forma de afectarlo?

En los siglos posteriores a la obra de Newton, estas cuestiones fueron a veces debatidas, pero no fue hasta mediados del siglo XIX, cuando el físico y filósofo austriaco Ernst Mach entró en escena, que se sugirió una nueva visión audaz, clarividente y extremadamente influyente sobre el espacio, una visión que, entre otras cosas, tendría a su debido tiempo un profundo impacto en Albert Einstein.

Para entender la perspicacia de Mach, o más precisamente, una lectura moderna de las ideas a menudo atribuidas a Mach [2], volvamos al cubo por un momento. Hay algo extraño en el argumento de Newton. El experimento del cubo nos desafía a explicar por qué la superficie del agua es plana en una situación y cóncava en otra. Buscando explicaciones, examinamos las dos situaciones y nos dimos cuenta de que la diferencia clave entre ellas era si el agua giraba o no. No es sorprendente que tratáramos de explicar la forma de la superficie del agua apelando a su estado de movimiento. Pero aquí está el asunto: antes de introducir el espacio absoluto, Newton se centró únicamente en el cubo como posible referencia para determinar el movimiento del agua y, como vimos, ese enfoque falla. Hay otras referencias, sin embargo, que podríamos usar naturalmente para medir el movimiento del agua, como el laboratorio en el que se realiza el experimento, su suelo, techo y paredes. O si realizamos el experimento en un día soleado en un campo abierto, los edificios o árboles circundantes, o el suelo bajo nuestros pies, proporcionarían la referencia "estacionaria" para determinar si el agua está girando. Y si realizamos este experimento mientras estamos flotando en el espacio exterior, invocaríamos a las estrellas distantes como nuestra referencia estacionaria.

Esto nos lleva a la siguiente pregunta. ¿Podría Newton haber pateado el cubo a un lado con tal facilidad que se salteó demasiado rápido el movimiento relativo que somos propensos a invocar en la vida real, como por ejemplo entre el agua y el laboratorio, o el agua y la tierra, o el agua y las estrellas fijas en el cielo? ¿Podría

ser que tal movimiento relativo *pueda explicar* la forma de la superficie del agua, eliminando la necesidad de introducir el concepto de espacio absoluto? Esa fue la línea de interrogatorio planteada por Mach en la década de 1870.

Para entender el punto de Mach más completamente, imagina que estás flotando en el espacio exterior, sintiéndote calmado, inmóvil e ingrávido. Miras hacia afuera y puedes ver las estrellas distantes, y también parecen estar perfectamente estacionarias. (Es un verdadero momento Zen.) Justo entonces, alguien pasa flotando, te agarra y te pone a girar. Notarás dos cosas. Primero, tus brazos y piernas se sentirán arrancados de tu cuerpo y si los dejas ir se extenderán hacia afuera. Segundo, cuando mires hacia las estrellas, ya no parecerán inmóviles. En su lugar, parecerán estar girando en grandes arcos circulares a través de los cielos distantes. Su experiencia revela así una estrecha asociación entre sentir una fuerza en su cuerpo y presenciar el movimiento con respecto a las estrellas distantes. Tengan esto en mente mientras intentamos el experimento de nuevo pero en un entorno diferente.

Imagina ahora que estás inmerso en la oscuridad del espacio *completamente* vacío: sin estrellas, sin galaxias, sin planetas, sin aire, nada más que oscuridad total. (Un verdadero momento existencial.) Esta vez, si empiezas a girar, ¿lo sentirás? ¿Sentirás tus brazos y piernas estirados hacia afuera? Nuestras experiencias en el día a día nos llevan a responder que sí: cada vez que pasamos de no girar (un estado en el que no sentimos nada) a girar, sentimos la diferencia a medida que nuestros apéndices son sacados hacia afuera. Pero el ejemplo actual no se parece a nada que ninguno de nosotros haya experimentado nunca. En el universo tal como lo conocemos, siempre hay otros objetos materiales, ya sea cercanos o, al menos, lejanos (como las estrellas distantes), que pueden servir de referencia para nuestros diversos estados de movimiento. En este ejemplo, sin embargo, no hay absolutamente ninguna manera de distinguir "no girando" de "girando" por comparaciones con otros objetos materiales; *no hay* ningún otro objeto material. Mach se tomó esta observación a pecho y la amplió un paso gigante más. Sugirió que en este caso tampoco hay manera de *sentir* una diferencia entre los diversos estados de giro. Más precisamente, Mach argumentó que en un universo por lo demás vacío no hay *distinción* entre girar y no girar -no existe una concepción del movimiento o la aceleración si no hay puntos de referencia para la comparación-, por lo que girar y no girar es lo mismo. Si las dos rocas de Newton unidas por una cuerda se pusieran a girar en un universo por lo demás vacío, Mach razonó que la cuerda seguiría siendo floja. Si girara en un universo por lo demás vacío, sus brazos y piernas no se extenderían hacia afuera, y el líquido de sus oídos no se vería afectado; no sentiría nada.

Esta es una sugerencia profunda y sutil. Para absorberla realmente, hay que ponerse en el ejemplo e imaginar plenamente la negra y uniforme quietud del espacio totalmente vacío. No es como una habitación oscura en la que sientes el suelo bajo tus pies o en la que tus ojos se ajustan lentamente a la pequeña

cantidad de luz que se filtra desde fuera de la puerta o la ventana; en cambio, estamos imaginando que *no ha*cosas, así que no hay suelo y no hay absolutamente ninguna luz a la que ajustarse. Independientemente de donde alcances o mires, no sientes ni ves absolutamente nada. Estás envuelto en un capullo de negrura invariable, sin puntos de referencia materiales para la comparación. Y sin tales puntos de referencia, Mach argumentó, los mismos conceptos de movimiento y aceleración dejan de tener significado. No es sólo que no se sienta nada si se gira; es más básico. En un universo por lo demás vacío, estar perfectamente inmóvil y girar uniformemente son indistinguibles. [3]

Newton, por supuesto, habría estado en desacuerdo. Afirmó que incluso el espacio completamente vacío todavía tiene *espacio.* Y, aunque el espacio no es tangible o directamente comprensible, Newton argumentó que todavía proporciona un algo con respecto a lo que se puede decir que los objetos materiales se mueven. Pero recuerden cómo Newton llegó a esta conclusión: Reflexionó sobre el movimiento de rotación y *asumió* que los resultados familiares del laboratorio (la superficie del agua se vuelve cóncava; Homero se siente presionado contra la pared del cubo; sus brazos se extienden hacia afuera cuando gira; la cuerda atada entre dos rocas que giran se tensa) se mantendrían si el experimento se llevara a cabo en el espacio vacío. Esta suposición lo llevó a buscar algo en el espacio vacío con respecto al cual se pudiera definir el movimiento, y el algo que se le ocurrió fue el espacio mismo. Mach desafió fuertemente la suposición clave: Argumentó que lo que sucede en el laboratorio no es lo que sucedería en un espacio completamente vacío.

El de Mach fue el primer desafío significativo para el trabajo de Newton en más de dos siglos, y durante años envió ondas de choque a través de la comunidad física (y más allá: en 1909, mientras vivía en Londres, Vladimir Lenin escribió un panfleto filosófico que, entre otras cosas, discutió aspectos del trabajo de Mach [11]). Pero si Mach tenía razón y no existía la noción de girar en un universo por lo demás vacío -un estado de cosas que eliminaría la justificación de Newton para el espacio absoluto- eso todavía deja el problema de explicar el experimento del cubo terrestre, en el que el agua ciertamente toma una forma cóncava. Sin invocar el espacio absoluto, si el espacio absoluto no es algo, ¿cómo explicaría Mach la forma del agua? La respuesta surge al pensar en una simple objeción al razonamiento de Mach.

Mach, el movimiento y las estrellas

Imagina un universo que no está completamente vacío, como lo imaginó Mach, sino que tiene sólo un puñado de estrellas esparcidas por el cielo. Si realizas el experimento de giro en el espacio exterior ahora, las estrellas, incluso si aparecen como meros pinchazos de luz provenientes de una enorme distancia,

proporcionan un medio para medir tu estado de movimiento. Si empiezas a girar, los puntos de luz distantes parecerán rodearte. Y como las estrellas proporcionan una referencia visual que te permite distinguir entre girar y no girar, esperarías poder sentirlo también. Pero ¿cómo pueden unas pocas estrellas distantes hacer tal diferencia, su presencia o ausencia actuando de alguna manera como un interruptor que enciende o apaga la sensación de giro (o más generalmente, la sensación de movimiento acelerado)? Si se puede sentir el movimiento giratorio en un universo con sólo unas pocas estrellas distantes, tal vez eso signifique que la idea de Mach es simplemente errónea; tal vez, como supuso Newton, en un universo vacío *se sentiría* la sensación de estar girando.

Mach ofreció una respuesta a esta objeción. En un universo vacío, según Mach, no se siente nada si se gira (más precisamente, ni siquiera existe el concepto de girar o no girar). En el otro extremo del espectro, en un universo poblado por todas las estrellas y otros objetos materiales existentes en nuestro universo real, la fuerza de separación en tus brazos y piernas es lo que experimentas cuando realmente giras. (Inténtalo.) Y aquí está el punto, en un universo que no está vacío pero que tiene menos materia que el nuestro, Mach sugirió que la fuerza que sentirías al girar se situaría entre la nada y lo que sentirías en nuestro universo. Es decir, la fuerza que sientes es proporcional a la cantidad de materia en el universo. En un universo con una sola estrella, sentirías una fuerza minúscula en tu cuerpo si empezaras a girar. Con dos estrellas, la fuerza sería un poco más fuerte, y así sucesivamente, hasta llegar a un universo con el contenido material propio, en el que se siente toda la fuerza familiar del giro. En este enfoque, la fuerza que sientes por la aceleración surge como un efecto colectivo, una influencia colectiva de toda la otra materia del universo.

Una vez más, la propuesta es válida para todo tipo de movimiento acelerado, no sólo para el giro. Cuando el avión en el que estás acelerando baja por la pista, cuando el coche en el que estás se detiene chirriando, cuando el ascensor en el que estás empieza a subir, las ideas de Mach implican que la fuerza que sientes representa la influencia combinada de toda la otra materia que compone el universo. Si hubiera más materia, sentirías una fuerza mayor. Si hubiera menos materia, sentirías menos fuerza. Y si no hubiera materia, no sentirías nada en absoluto. Así que, en la forma de pensar de Mach, sólo el movimiento relativo y la aceleración relativa de la materia.Sólo se siente aceleración *cuando se acelera en relación con la distribución media de otra materia que habita el cosmos.* Sin otro material -sin puntos de referencia para la comparación- Mach afirmaba que no habría forma de experimentar la aceleración.

Para muchos físicos, esta es una de las propuestas más seductoras sobre el cosmos presentadas durante el último siglo y medio. Generaciones de físicos han encontrado profundamente inquietante imaginar que el tejido intocable, inasible e inabarcable del espacio es realmente un algo, algo lo suficientemente sustancial como para proporcionar el punto de referencia último y absoluto para el

movimiento. A muchos les ha parecido absurdo, o al menos científicamente irresponsable, basar la comprensión del movimiento en algo tan completamente imperceptible, tan completamente más allá de nuestros sentidos, que roza lo místico. Sin embargo, estos mismos físicos fueron perseguidos por la cuestión de cómo explicar el cubo de Newton. Las ideas de Mach generaron entusiasmo porque plantearon la posibilidad de una nueva respuesta, una en la que el espacio no es un algo, una respuesta que apunta hacia la concepción relacionalista del espacio defendida por Leibniz. El espacio, en opinión de Mach, es muy parecido a lo que Leibniz imaginaba, es el lenguaje para expresar la relación entre la posición de un objeto y la de otro. Pero, como un alfabeto sin letras, el espacio no tiene una existencia independiente.

Mach contra Newton

Me enteré de las ideas de Mach cuando era estudiante, y fueron un regalo del cielo. Aquí, finalmente, había una teoría del espacio y el movimiento que ponía todas las perspectivas en igualdad de condiciones, ya que sólo el movimiento relativo y la aceleración relativa tenían sentido. En lugar del punto de referencia newtoniano para el movimiento -una cosa invisible llamada espacio absoluto- el punto de referencia propuesto por Mach está al descubierto para que todos lo vean -la materia que está distribuida por todo el cosmos-. Estaba seguro de que Mach tenía que ser la respuesta. También aprendí que no era el único que tenía esta reacción; estaba siguiendo una larga línea de físicos, incluyendo a Albert Einstein, que habían sido arrastrados cuando se encontraron por primera vez con las ideas de Mach.

¿Mach tiene razón? ¿Newton quedó tan atrapado en el remolino de su cubo que llegó a una conclusión poco convincente sobre el espacio? ¿Existe el espacio absoluto de Newton, o el péndulo había girado firmemente de vuelta a la perspectiva relacionalista? Durante las primeras décadas después de que Mach introdujera sus ideas, estas preguntas no pudieron ser respondidas. En su mayor parte, la razón era que la sugerencia de Mach no era una teoría o descripción completa, ya que nunca especificó *cómo* el contenido de materia del universo ejercería la influencia propuesta. Si sus ideas eran correctas, ¿cómo contribuyen las estrellas distantes y la casa de al lado a su sensación de que está girando cuando gira? Sin especificar un mecanismo físico para realizar su propuesta, era difícil investigar las ideas de Mach con precisión.

Desde nuestro punto de vista moderno, una suposición razonable es que la gravedad podría tener algo que ver con las influencias involucradas en la sugerencia de Mach. En las décadas siguientes, esta posibilidad llamó la atención de Einstein y se inspiró mucho en la propuesta de Mach mientras desarrollaba su propia teoría de la gravedad, la teoría general de la relatividad. Cuando finalmente

se asentó el polvo de la relatividad, la cuestión de si el espacio es un algo -de si la visión absolutista o relativista del espacio es correcta- se transformó de una manera que hizo añicos todas las formas anteriores de ver el universo.

3 - La Relatividad y el Absoluto

¿ES EL ESPACIO TIEMPO UNA ABSTRACCIÓN EINSTENIANA O UNA ENTIDAD FÍSICA?

Algunos descubrimientos proporcionan respuestas a preguntas. Otros descubrimientos son tan profundos que arrojan preguntas bajo una luz totalmente nueva, mostrando que los misterios anteriores fueron mal percibidos por falta de conocimiento. Podrías pasar toda una vida -en la antigüedad, algunos lo hicieron- preguntándote qué pasa cuando llegas al borde de la tierra, o tratando de averiguar quién o qué vive en el subsuelo de la tierra. Pero cuando aprendes que la tierra es redonda, ves que los misterios anteriores no se resuelven, sino que se vuelven irrelevantes.

Durante las primeras décadas del siglo XX, Albert Einstein hizo dos profundos descubrimientos. Cada uno de ellos causó un cambio radical en nuestra comprensión del espacio y el tiempo. Einstein desmanteló las rígidas y absolutas estructuras que Newton había erigido, y construyó su propia torre, sintetizando el espacio y el tiempo de una manera completamente inesperada. Cuando terminó, el tiempo estaba tan enredado en el espacio que la realidad de uno ya no podía ser considerada por separado del otro. Y así, en la tercera década del siglo XX la cuestión de la corporeidad del espacio quedó obsoleta; su replanteamiento einsteniano, como hablaremos en breve, se convirtió: ¿Es *el espacio tiempo* un algo? Con esa aparentemente ligera modificación, nuestra comprensión de la arena de la realidad se transformó.

¿El espacio vacío está vacío?

La luz fue el principal actor en el drama de la relatividad escrito por Einstein en los primeros años del siglo XX. Y fue el trabajo de James Clerk Maxwell el que preparó el escenario para las ideas de Einstein. A mediados del siglo XIX, Maxwell descubrió cuatro poderosas ecuaciones que, por primera vez, establecieron un riguroso marco teórico para comprender la electricidad, el magnetismo y su íntima relación. [1] Maxwell desarrolló estas ecuaciones estudiando cuidadosamente el trabajo del físico inglés Michael Faraday, quien a principios del siglo XIX había llevado a cabo decenas de miles de experimentos que exponían características hasta entonces desconocidas de la electricidad y el magnetismo. El avance clave

de Faraday fue el concepto de *campo.* Más tarde ampliado por Maxwell y muchos otros, este concepto ha tenido una enorme influencia en el desarrollo de la física durante los dos últimos siglos, y subyace a muchos de los pequeños misterios que encontramos en la vida cotidiana. Cuando pasas por la seguridad de un aeropuerto, ¿cómo es que una máquina que no te toca puede determinar si llevas objetos metálicos? Cuando te hacen una resonancia magnética, ¿cómo es que un dispositivo que permanece fuera de tu cuerpo puede tomar una foto detallada de tu interior? Cuando miras una brújula, ¿cómo es que la aguja gira y apunta al norte aunque nada parece empujarla? La respuesta familiar a la última pregunta invoca el campo magnético de la Tierra, y el concepto de campos magnéticos ayuda a explicar también los dos ejemplos anteriores.

Nunca he visto una mejor manera de obtener un sentido visceral de un campo magnético que la demostración en la escuela primaria en la que se rocían limaduras de hierro en la proximidad de una barra magnética. Después de una pequeña sacudida, las limaduras de hierro se alinean en un patrón ordenado de arcos que empiezan en el polo norte del imán y giran hacia arriba y alrededor, para terminar en el polo sur del imán, como en la figura 3.1. El patrón trazado por las limaduras de hierro es una prueba directa de que el imán crea un algo invisible que impregna el espacio que lo rodea, algo que puede, por ejemplo, ejercer una fuerza sobre los fragmentos de metal. El algo invisible es el *campo magnético* y, según nuestra intuición, se asemeja a una niebla o esencia que puede llenar una región del espacio y por lo tanto ejercer una fuerza más allá de la extensión física del propio imán. Un campo magnético proporciona un imán lo que un ejército proporciona a un dictador y lo que los auditores proporcionan al IRS: influencia más allá de sus límites físicos, que permite ejercer una fuerza en el "campo". Es por eso que un campo magnético es también llamado un campo de fuerza.

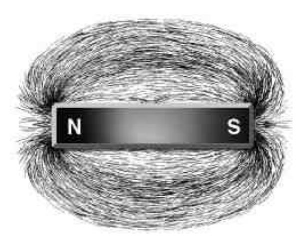


Figura 3.1 Las limaduras de hierro rociadas cerca de una barra magnética trazan su campo magnético.

Es la capacidad omnipresente de los campos magnéticos de llenar el espacio lo que los hace tan útiles. El campo magnético de un detector de metales de un aeropuerto se filtra a través de la ropa y hace que los objetos metálicos emitan sus propios campos magnéticos-campos que luego ejercen una influencia en el detector, haciendo que su alarma suene. El campo magnético de una resonancia magnética se filtra en tu cuerpo, causando que determinados átomos giren de la

forma correcta para generar sus propios campos magnéticos - campos que la máquina puede detectar y decodificar en una imagen de los tejidos internos. El campo magnético de la Tierra se filtra a través de la carcasa de la brújula y gira la aguja, haciendo que apunte a lo largo de un arco que, como resultado de procesos geofísicos de eones de duración, está alineado en una dirección casi sur-norte.

Los campos magnéticos son un tipo de campo familiar, pero Faraday también analizó otro: el *campo eléctrico.* Este es el campo que hace que tu bufanda de lana cruja, que tu mano se cierre en una habitación alfombrada cuando tocas un pomo de puerta de metal, y que tu piel sienta un cosquilleo cuando estás en las montañas durante una poderosa tormenta de rayos. Y si examinara una brújula durante tal tormenta, la forma en que su aguja magnética se desvió de esta manera y que como los rayos eléctricos destellaron cerca le habría dado un indicio de una profunda interconexión entre los campos eléctricos y magnéticos - algo descubierto por primera vez por el físico danés Hans Oersted e investigado a fondo por Faraday a través de una cuidadosa experimentación. Así como los desarrollos en el mercado de valores pueden afectar al mercado de bonos, que a su vez puede afectar al mercado de valores, y así sucesivamente, estos científicos encontraron que los cambios en un campo eléctrico pueden producir cambios en un campo magnético cercano, que a su vez puede causar cambios en el campo eléctrico, y así sucesivamente. Maxwell encontró los fundamentos matemáticos de estas interrelaciones, y debido a que sus ecuaciones mostraron que los campos eléctricos y magnéticos están tan entrelazados como las fibras en las rastas de un rastafari, fueron eventualmente bautizados como campos electromagnéticos, y la influencia que ejercen la fuerza electromagnética.

Hoy en día, estamos constantemente inmersos en un mar de campos electromagnéticos. El teléfono celular y la radio del coche funcionan en enormes extensiones porque los campos electromagnéticos emitidos por las compañías telefónicas y las estaciones de radio cubren regiones impresionantes del espacio. Lo mismo ocurre con las conexiones inalámbricas a Internet; las computadoras pueden arrancar toda la World Wide Web de los campos electromagnéticos que están vibrando a nuestro alrededor - de hecho, a través de nosotros. Por supuesto, en los tiempos de Maxwell, la tecnología electromagnética estaba menos desarrollada, pero entre los científicos su hazaña no era menos reconocida: a través del lenguaje de los campos, Maxwell había demostrado que la electricidad y el magnetismo, aunque inicialmente se consideraban distintos, en realidad son sólo aspectos diferentes de una única entidad física.

Más tarde, nos encontraremos con otros tipos de campos - campos gravitacionales, campos nucleares, campos de Higgs, y así sucesivamente - y será cada vez más claro que el concepto de campo es central para nuestra moderna formulación de la ley física. Pero por ahora el siguiente paso crítico en nuestra historia también se debe a Maxwell. Al analizar más a fondo sus ecuaciones, encontró que los cambios o perturbaciones de los campos

electromagnéticos viajan de manera ondulatoria a una velocidad particular: 670 millones de millas por hora. Como este es precisamente el valor que otros experimentos habían encontrado para la velocidad de la luz, Maxwell se dio cuenta de que la luz no debe ser otra cosa que una onda electromagnética, una que tiene las propiedades adecuadas para interactuar con los químicos en nuestras retinas y darnos la sensación de vista. Este logro hizo que los ya imponentes descubrimientos de Maxwell fueran aún más notables: había vinculado la fuerza producida por los imanes, la influencia ejercida por las cargas eléctricas y la luz que usamos para ver el universo, pero también planteó una profunda pregunta.

Cuando decimos que la velocidad de la luz es de 670 millones de millas por hora, la experiencia, y nuestra discusión hasta ahora, nos enseñan que esta es una afirmación sin sentido si no especificamos en relación a *qué se* mide esta velocidad. Lo curioso es que las ecuaciones de Maxwell sólo dieron este número, 670 millones de millas por hora, sin especificar o aparentemente confiar en ninguna de estas referencias. Era como si alguien diera la ubicación de una fiesta a 22 millas al norte sin especificar la ubicación de referencia, sin especificar el norte de *qué.* La mayoría de los físicos, incluyendo a Maxwell, intentaron explicar la velocidad que sus ecuaciones daban de la siguiente manera: Las ondas familiares como las olas del océano o las ondas de sonido son transportadas por una sustancia, un medio. Las ondas oceánicas son transportadas por el agua. Las ondas sonoras son transportadas por el aire. Y las velocidades de estas ondas se especifican *con respecto al medio.* Cuando hablamos de que la velocidad del sonido a temperatura ambiente es de 767 millas por hora (también conocido como Mach 1, por el mismo Ernst Mach encontrado anteriormente), queremos decir que las ondas sonoras viajan a través del aire, que de otra manera sería inmóvil, a esta velocidad. Naturalmente, entonces, los físicos suponían que las ondas de luz - ondas electromagnéticas - también deben viajar a través de algún medio en particular, uno que nunca había sido visto o detectado pero que debe existir. Para dar a este material invisible portador de luz el debido respeto, se le dio un nombre: el éter luminiscente, o el *éter* para abreviar, siendo este último un antiguo término que Aristóteles usó para describir la mágica sustancia atrapadora de la que se imaginaba que estaban hechos los cuerpos celestes. Y, para cuadrar esta propuesta con los resultados de Maxwell, se sugirió que sus ecuaciones implícitamente tomaban la perspectiva de alguien en reposo con respecto al éter. Los 1.000 millones de kilómetros por hora que sus ecuaciones arrojaron fue la velocidad de la luz en relación al éter estacionario.

Como pueden ver, hay una sorprendente similitud entre el éter lumínico y el espacio absoluto de Newton. Ambos se originaron en los intentos de proporcionar una referencia para definir el movimiento; el movimiento acelerado llevó al espacio absoluto, el movimiento de la luz llevó al éter luminiscente. De hecho, muchos físicos vieron el éter como un sustituto realista del espíritu divino que Henry More, Newton y otros habían imaginado que impregnaría el espacio absoluto. (Newton y

otros en su época incluso habían usado el término "éter" en sus descripciones del espacio absoluto). ¿Pero qué *es realmente* el éter? ¿De qué está hecho? ¿De dónde viene? ¿Existe en todas partes?

Estas preguntas sobre el éter son las mismas que durante siglos se han hecho sobre el espacio absoluto. Pero mientras que la prueba completa de Machian para el espacio absoluto implicaba dar vueltas en un universo completamente vacío, los físicos pudieron proponer experimentos factibles para determinar si el éter realmente existía. Por ejemplo, si nadas a través del agua hacia una ola de agua en dirección contraria, la ola se acerca a ti más rápidamente; si nadas lejos de la ola, se acerca a ti más lentamente. De manera similar, si te mueves a través del supuesto éter hacia o lejos de una onda de luz en dirección contraria, el acercamiento de la onda de luz debería, por el mismo razonamiento, ser más rápido o más lento que a 670 millones de millas por hora. En 1887, sin embargo, cuando Albert Michelson y Edward Morley midieron la velocidad de la luz, una y otra vez encontraron exactamente la misma velocidad de 670 millones de millas por hora *sin importar su movimiento o el de la fuente de luz.* Todo tipo de argumentos inteligentes fueron ideados para explicar estos resultados. Tal vez, algunos sugirieron, que los experimentadores estaban arrastrando sin querer el éter con ellos mientras se movían. Tal vez, algunos se aventuraron a decir que el equipo se deformaba al moverse a través del éter, corrompiendo las mediciones. Pero no fue hasta que Einstein tuvo su visión revolucionaria que la explicación finalmente se hizo clara.

Espacio relativo, tiempo relativo

En junio de 1905, Einstein escribió un artículo con el modesto título "Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento", que de una vez por todas significaba el fin del éter lumínico. De un solo golpe, también cambió para siempre nuestra comprensión del espacio y el tiempo. Einstein formuló las ideas en el documento durante un intenso período de cinco semanas en abril y mayo de 1905, pero las cuestiones que finalmente dejó en suspenso lo habían estado carcomiendo durante más de una década. En su adolescencia, Einstein luchó con la cuestión de cómo sería una onda de luz si la persiguiera a la velocidad exacta de la luz. Como tú y la onda de luz atravesarían el éter exactamente a la misma velocidad, mantendrías un ritmo perfecto con la luz. Y así, Einstein concluyó, desde tu perspectiva la luz debería parecer como si no se estuviera moviendo. Deberías ser capaz de alcanzar y agarrar un puñado de luz inmóvil como puedes agarrar un puñado de nieve recién caída.

Pero aquí está el problema. Resulta que las ecuaciones de Maxwell no permiten que la luz aparezca estacionaria, como si estuviera parada. Y ciertamente, no hay ningún informe fiable de que alguien haya captado un grupo de luz estacionario.

Entonces, el adolescente Einstein preguntó, ¿qué debemos hacer con esta aparente paradoja?

Diez años después, Einstein dio al mundo su respuesta con su especial teoría de la relatividad. Ha habido mucho debate sobre las raíces intelectuales del descubrimiento de Einstein, pero no hay duda de que su inquebrantable creencia en la simplicidad jugó un papel fundamental. Einstein era consciente de al menos algunos experimentos que no habían logrado detectar pruebas de la existencia del éter. [2] Así que, ¿por qué bailar alrededor tratando de encontrar fallas en los experimentos? En lugar de eso, Einstein declaró, tomar el enfoque simple: Los experimentos fallaron en encontrar el éter porque no hay éter. Y como las ecuaciones de Maxwell que describen el movimiento de la luz -el movimiento de las ondas electromagnéticas- no invocan ningún medio, tanto el experimento como la teoría convergerían en la misma conclusión: la luz, a diferencia de cualquier otro tipo de onda jamás encontrada, no necesita un medio para transportarla. La luz es un viajero solitario. La luz puede viajar a través del espacio vacío.

Pero, entonces, ¿qué vamos a hacer con la ecuación de Maxwell que da a la luz una velocidad de 670 millones de millas por hora? Si no hay un éter que proporcione el estándar de reposo, ¿cuál es el *qué* con respecto al cual esta velocidad debe ser interpretada? Una vez más, Einstein se saltó la convención y respondió con la máxima simplicidad. Si la teoría de Maxwell no invoca ningún estándar de descanso en particular, la interpretación más directa es que no necesitamos uno.*La velocidad de la luz,* declaró Einstein, *es de 670 millones de millas por hora en relación con cualquier cosa y todo.*

Bueno, esto es ciertamente una simple afirmación; encaja bien con una máxima a menudo atribuida a Einstein: "Haz todo lo más simple posible, pero no más simple". El problema es que también parece una locura. Si corres tras un rayo de luz que se aleja, el sentido común dicta que desde tu perspectiva la velocidad de la luz que se aleja tiene que ser inferior a 670 millones de millas por hora. Si corres hacia un rayo de luz que se aproxima, el sentido común dicta que desde tu perspectiva la velocidad de la luz que se aproxima será mayor de 670 millones de millas por hora. A lo largo de su vida, Einstein desafió el sentido común, y esta vez no fue la excepción. Argumentó enérgicamente que sin importar cuán rápido te acercas o te alejas de un rayo de luz, siempre medirás su velocidad para que sea de 670 millones de millas por hora, ni un poco más rápido, ni un poco más lento, sin importar qué. Esto ciertamente resolvería la paradoja que lo dejó perplejo cuando era adolescente: La teoría de Maxwell no permite la luz estacionaria porque la luz *nunca* es estacionaria; independientemente de su estado de movimiento, ya sea que persiga un rayo de luz, o corra de él, o simplemente se quede quieta, la luz mantiene su única velocidad fija y nunca cambiante de 670 millones de millas por hora. Pero, naturalmente nos preguntamos, ¿cómo puede la luz comportarse de manera tan extraña?

Piensa en la velocidad por un momento. La velocidad se mide por lo lejos que llega algo dividido por el tiempo que tarda en llegar. Es una medida del espacio (la distancia recorrida) dividida por una medida del tiempo (la duración del viaje). Desde Newton, el espacio ha sido pensado como absoluto, como estar ahí fuera, como existir "sin referencia a nada externo". Por lo tanto, las mediciones del espacio y las separaciones espaciales también deben ser absolutas: independientemente de quién mida la distancia entre dos cosas en el espacio, si las mediciones se hacen con el cuidado adecuado, las respuestas siempre estarán de acuerdo. Y aunque todavía no lo hemos discutido directamente, Newton declaró que lo mismo se aplica al tiempo. Su descripción del tiempo en los *Principados se* hace eco del lenguaje que usó para el espacio: "El tiempo existe en sí mismo y fluye equitativamente sin referencia a nada externo". En otras palabras, según Newton, hay una concepción universal y absoluta del tiempo que se aplica en todas partes y en todo momento. En un universo newtoniano, independientemente de quién mida el tiempo que tarda en suceder algo, si las mediciones se hacen con precisión, las respuestas siempre estarán de acuerdo.

Estas suposiciones sobre el espacio y el tiempo se corresponden con nuestras experiencias diarias y por esa razón son la base de nuestra conclusión de sentido común de que la luz debería parecer que viaja más lentamente si corremos tras ella. Para ver esto, imagina que Bart, que acaba de recibir una nueva patineta de energía nuclear, decide tomar el último reto y correr un rayo de luz. Aunque está un poco decepcionado al ver que la velocidad máxima de la patineta es de sólo 500 millones de millas por hora, está decidido a dar lo mejor de sí. Su hermana Lisa está lista con un láser; cuenta atrás desde 11 (el número favorito de su héroe Schopenhauer) y cuando llega a 0, Bart y el rayo de luz del láser se dispersan en la distancia. ¿Qué ve Lisa? Bueno, por cada hora que pasa, Lisa ve que la luz viaja 670 millones de millas mientras que Bart viaja sólo 500 millones de millas, por lo que Lisa concluye acertadamente que la luz se aleja de Bart a 170 millones de millas por hora. Ahora traigamos a Newton a la historia. Sus ideas dictan que las observaciones de Lisa sobre el espacio y el tiempo son absolutas y universales en el sentido de que cualquiera que realice estas mediciones obtendrá las mismas respuestas. Para Newton, tales hechos sobre el movimiento a través del espacio y el tiempo eran tan objetivos como dos más dos igual a cuatro. Según Newton, entonces, Bart estará de acuerdo con Lisa e informará que el rayo de luz se alejaba de él a 170 millones de millas por hora.

Pero cuando Bart regresa, no está de acuerdo en absoluto. En cambio, afirma abatidamente que no importa lo que hizo, no importa cuánto empujó el límite de la patineta, vio la velocidad de la luz a 670 millones de millas por hora, ni un poco menos. [3] Y si por alguna razón usted no confía en Bart, tenga en cuenta que miles de meticulosos experimentos llevados a cabo durante los últimos cien años, que han medido la velocidad de la luz usando fuentes y receptores en movimiento, apoyan sus observaciones con precisión.

¿Cómo puede ser esto?

Einstein lo descubrió, y la respuesta que encontró es una extensión lógica pero profunda de nuestra discusión hasta ahora. Debe ser que las medidas de Bart de distancias y duraciones, la entrada que usa para averiguar cuán rápido se aleja la luz de él, son diferentes de las medidas de Lisa. Piensa en ello. Dado que la velocidad no es más que la distancia dividida por el tiempo, no hay otra forma de que Bart haya encontrado una respuesta diferente a la de Lisa sobre lo rápido que la luz se aleja de él. Así que, Einstein concluyó que las ideas de Newton sobre el espacio y el tiempo absolutos estaban equivocadas. Einstein se dio cuenta de que los experimentadores que se mueven en relación a los demás, como Bart y Lisa, no encontrarán valores idénticos para las mediciones de distancias y duraciones. Los desconcertantes datos experimentales sobre la velocidad de la luz sólo pueden explicarse si sus percepciones del espacio y el tiempo son diferentes.

Sutil pero no malicioso

La relatividad del espacio y del tiempo es una conclusión sorprendente. La conozco desde hace más de 25 años, pero aún así, siempre que me siento tranquilamente a pensar en ella, me sorprende. De la bien conocida afirmación de que la velocidad de la luz es constante, concluimos que *el espacio y el tiempo están en el ojo del observador.* Cada uno de nosotros lleva su propio reloj, su propio monitor del paso del tiempo. Cada reloj es igualmente preciso, pero cuando nos movemos en relación con el otro, estos relojes no coinciden. No están sincronizados; miden diferentes cantidades de tiempo transcurrido entre dos eventos elegidos. Lo mismo ocurre con la distancia. Cada uno de nosotros lleva su propia vara de medir, su propio monitor de distancia en el espacio. Cada vara de medir es igualmente precisa, pero cuando nos movemos en relación con el otro, estas varas de medir no concuerdan; miden diferentes distancias entre las ubicaciones de dos eventos especificados. Si el espacio y el tiempo no se comportasen de esta manera, la velocidad de la luz no sería constante y dependería del estado de movimiento del observador. Pero *es* constante; el espacio y el tiempo *se* comportan de esta manera. El espacio y el tiempo se ajustan de una manera exactamente compensatoria de modo que las observaciones de la velocidad de la luz dan el mismo resultado, independientemente de la velocidad del observador.

Obtener los detalles cuantitativos de cómo exactamente las medidas del espacio y el tiempo difieren es más complicado, pero sólo requiere de álgebra de la escuela secundaria. No es la profundidad de las matemáticas lo que hace que la relatividad especial de Einstein sea un desafío. Es el grado en que las ideas son extrañas y aparentemente inconsistentes con nuestras experiencias diarias. Pero una vez que Einstein tuvo la visión clave -la comprensión de que necesitaba

romper con la perspectiva newtoniana de más de doscientos años de antigüedad sobre el espacio y el tiempo- no fue difícil completar los detalles. Fue capaz de mostrar con precisión cómo las medidas de distancias y duraciones de una persona deben diferir de las de otra para asegurar que cada una de ellas mida un valor idéntico para la velocidad de la luz.[4]

Para tener una idea más completa de lo que Einstein encontró, imagínese que Bart, con el corazón pesado, ha llevado a cabo la adaptación obligatoria de su patineta, que ahora tiene una velocidad máxima de 65 millas por hora. Si se dirige hacia el norte a máxima velocidad - leyendo, silbando, bostezando y ocasionalmente echando un vistazo a la carretera - y luego se une a una autopista que apunta en dirección noreste, su velocidad en la dirección norte será *inferior* a 65 millas por hora. La razón es clara. Inicialmente, toda su velocidad se dedicaba al movimiento hacia el norte, pero cuando cambió de dirección parte de esa velocidad se desvió hacia el movimiento hacia el este, dejando un poco menos para ir hacia el norte. Esta idea extremadamente simple nos permite capturar la idea central de la relatividad especial. Aquí está cómo:

Estamos acostumbrados al hecho de que los objetos pueden moverse a través del espacio, pero hay otro tipo de movimiento que es igualmente importante: los objetos también se mueven a través del tiempo. En este momento, el reloj de tu muñeca y el de la pared están haciendo tictac, mostrando que tú y todo lo que te rodea se mueven implacablemente a través del tiempo, moviéndose implacablemente de un segundo a otro y al siguiente. Newton pensaba que el movimiento a través del tiempo estaba totalmente separado del movimiento a través del espacio, pensaba que estos dos tipos de movimiento no tenían nada que ver entre sí. Pero Einstein descubrió que están íntimamente ligados. De hecho, *el* descubrimiento revolucionario de la relatividad especial es éste: Cuando miras algo como un coche aparcado, que desde tu punto de vista está parado, no se mueve a través del espacio, es decir, *todo* su movimiento es a través del tiempo. El coche, su conductor, la calle, tú, tu ropa, todos se mueven a través del tiempo en perfecta sincronía: segundo seguido de segundo, haciendo tictac de manera uniforme. Pero si el coche se aleja, parte de su movimiento a través del tiempo se *desvía* hacia el movimiento a través del espacio. Y así como la velocidad de Bart en la dirección norte disminuyó cuando desvió parte de su movimiento hacia el norte al movimiento hacia el este, la velocidad del coche a través del *tiempo* disminuye cuando desvía parte de su movimiento a través del tiempo al movimiento a través del espacio. Esto significa que el progreso del coche a través del tiempo se ralentiza y, por lo tanto, *el tiempo transcurre más lentamente para el coche en movimiento y su conductor que el que transcurre para usted y todo lo demás que permanece inmóvil.*

Eso, en pocas palabras, es relatividad especial. De hecho, podemos ser un poco más precisos y llevar la descripción un paso más allá. Debido a la adaptación, Bart no tuvo más remedio que limitar su velocidad máxima a 65 millas por hora. Esto es

importante para la historia, porque si aceleraba lo suficiente cuando se inclinaba hacia el noreste, podría haber compensado la desviación de la velocidad y así mantener la misma velocidad neta hacia el norte. Pero con la adaptación, no importa cuán fuerte haya revolucionado el motor de la patineta, su velocidad total - la combinación de su velocidad hacia el norte y su velocidad hacia el este - se mantuvo fija en el máximo de 65 millas por hora. Y así, cuando cambió su dirección un poco hacia el este, necesariamente causó una disminución de la velocidad hacia el norte.

La relatividad especial declara una ley similar para todo el movimiento: *la velocidad combinada del movimiento de cualquier objeto a través del espacio y su movimiento a través del tiempo es siempre exactamente igual a la velocidad de la luz.* Al principio, puede retroceder instintivamente de esta declaración ya que todos estamos acostumbrados a la idea de que nada más que la luz puede viajar a la velocidad de la luz. *Pero esa idea familiar se refiere únicamente al movimiento a través del espacio.* Ahora estamos hablando de algo relacionado, pero más rico: el movimiento combinado de un objeto a través del espacio y el tiempo. El hecho clave, descubierto por Einstein, es que estos dos tipos de movimiento son siempre complementarios. Cuando el coche aparcado que mirabas se aleja, lo que realmente ocurre es que parte de su movimiento a la velocidad de la luz se desvía del movimiento a través del tiempo al movimiento a través del espacio, *manteniendo su total combinado sin cambios.* Tal desviación significa incuestionablemente que el movimiento del coche a través del tiempo se ralentiza.

Por ejemplo, si Lisa hubiera podido ver el reloj de Bart a 500 millones de millas por hora, habría visto que hacía dos tercios de su velocidad. Por cada tres horas que pasaban en el reloj de Lisa, ella vería que sólo dos habían pasado en el de Bart. Su rápido movimiento a través del espacio habría demostrado ser una importante disminución de su velocidad a través del tiempo.

Además, la velocidad máxima a través del espacio se alcanza cuando todo el movimiento de la velocidad de la luz a través del tiempo se desvía completamente hacia el movimiento de la velocidad de la luz a través del espacio, una forma de entender por qué es imposible atravesar el espacio a una velocidad mayor que la de la luz. La luz, que siempre viaja a la velocidad de la luz a través del espacio, es especial porque siempre logra esa desviación total. Y así como conducir hacia el este no deja movimiento para viajar al norte, ¡moverse a la velocidad de la luz a través del espacio no deja movimiento para viajar a través del tiempo! El tiempo se detiene cuando viaja a la velocidad de la luz a través del espacio. Un reloj usado por una partícula de luz no haría ningún tictac. La luz realiza los sueños de Ponce de León y de la industria cosmética: no envejece.[5]

Como se desprende de esta descripción, los efectos de la relatividad especial son más pronunciados cuando las velocidades (a través del espacio) son una fracción significativa de la velocidad de la luz. Pero la naturaleza complementaria y poco

familiar del movimiento a través del espacio y el tiempo siempre se aplica. Cuanto menor es la velocidad, menor es la desviación de la física de la prerrelación -del sentido común, es decir- pero la desviación sigue estando ahí, para estar seguros.

De verdad. Esto no es un juego de palabras hábil, un juego de manos o una ilusión psicológica. Así es como funciona el universo.

En 1971, Joseph Hafele y Richard Keating volaron en un avión comercial de Pan Am con relojes atómicos de rayo de cesio de última generación por todo el mundo. Cuando compararon los relojes volados en el avión con relojes idénticos dejados en tierra, encontraron que había transcurrido menos tiempo en los relojes en movimiento. La diferencia era muy pequeña, unas pocas cientos de billonésimas de segundo, pero estaba precisamente de acuerdo con los descubrimientos de Einstein. No se puede obtener mucho más tuercas y pernos que eso.

En 1908, se empezó a correr la voz de que experimentos más nuevos y refinados estaban encontrando pruebas para el éter. [6] Si eso hubiera sido así, habría significado que había un estándar absoluto de descanso y que la relatividad especial de Einstein estaba equivocada. Al escuchar este rumor, Einstein respondió, "Sutil es el Señor, malicioso no es." Mirar profundamente en el funcionamiento de la naturaleza para descubrir el espacio y el tiempo fue un profundo desafío, uno que había obtenido lo mejor de todos hasta Einstein. Pero permitir que una teoría tan sorprendente y hermosa exista, y aún así hacerla irrelevante para el funcionamiento del universo, sería malicioso. Einstein no tendría nada de eso; descartó los nuevos experimentos. Su confianza estaba bien puesta. Los experimentos demostraron finalmente estar equivocados, y el éter lumínico se evaporó del discurso científico.

Pero, ¿qué pasa con el cubo?

Esta es ciertamente una historia ordenada para la luz. La teoría y el experimento coinciden en que la luz no necesita un medio para transportar sus ondas y que, independientemente del movimiento de la fuente de luz o de la persona que la observa, su velocidad es fija e invariable. Cada punto de vista está en igualdad de condiciones con los demás. No hay un estándar absoluto o preferido de descanso. Es grandioso. ¿Pero qué hay del cubo?

Recuerde, mientras que muchos vieron el éter luminiscente como la sustancia física que daba credibilidad al espacio absoluto de Newton, no tenía nada que ver con el motivo *por el que* Newton introdujo el espacio absoluto. En su lugar, después de discutir con el movimiento acelerado como el cubo giratorio, Newton no vio otra opción que invocar algunas cosas de fondo invisibles con respecto a las cuales el movimiento podría ser definido sin ambigüedades. Eliminar el éter no

eliminó el cubo, así que, ¿cómo hicieron frente a este problema Einstein y su especial teoría de la relatividad?

Bueno, a decir verdad, en la relatividad especial, el enfoque principal de Einstein estaba en un tipo especial de movimiento: el movimiento de velocidad constante. No fue hasta 1915, unos diez años más tarde, que se enfrentó plenamente a un movimiento más general y acelerado, a través de su teoría general de la relatividad. Aún así, Einstein y otros consideraron repetidamente la cuestión del movimiento de rotación utilizando los conocimientos de la relatividad especial; concluyeron, como Newton y a diferencia de Mach, que incluso en un universo por lo demás completamente vacío se sentiría la atracción exterior del giro: Homer se sentiría presionado contra la pared interior de un cubo giratorio; la cuerda entre las dos rocas giratorias se tensaría.[7] Habiendo desmantelado el espacio absoluto y el tiempo absoluto de Newton, ¿cómo explicó esto Einstein?

La respuesta es sorprendente. A pesar de su nombre, la teoría de Einstein no proclama que todo es relativo. La relatividad especial sí proclama que *algunas* cosas son relativas: las velocidades son relativas; las distancias a través del espacio son relativas; las duraciones del tiempo transcurrido son relativas. Pero la teoría introduce en realidad un nuevo y grandioso concepto absoluto: *el espacio tiempo absoluto.* El espacio tiempo absoluto es tan absoluto para la relatividad restringida como lo fueron el espacio absoluto y el tiempo absoluto para Newton, y en parte por esta razón Einstein no sugirió o particularmente le gustó el nombre "teoría de la relatividad". En su lugar, él y otros físicos sugirieron *la teoría de la invariancia,* subrayando que la teoría, en su núcleo, implica algo en lo que todo el mundo está de acuerdo, algo que no es relativo. [8]

El espacio tiempo absoluto es el siguiente capítulo vital en la historia del cubo, porque, aunque carece de todos los puntos de referencia materiales para definir el movimiento, el espacio tiempo absoluto de la relatividad especial proporciona un algo con respecto a lo que se puede decir que los objetos se aceleran.

Tallando el espacio y el tiempo

Para ver esto, imagina que Marge y Lisa, buscando un tiempo juntos de calidad, se inscriben en un curso de extensión del Instituto Burns sobre renovación urbana. Para su primera tarea, se les pide que rediseñen el trazado de calles y avenidas de Springfield, sujeto a dos requisitos: primero, la cuadrícula de calles y avenidas debe estar configurada de manera que el Monumento Nuclear Soaring esté ubicado justo en el centro de la cuadrícula, en la 5ª calle y la 5ª avenida, y, segundo, los diseños deben utilizar calles de 100 metros de largo, y avenidas, que corren perpendiculares a las calles, que también tienen 100 metros de largo. Justo antes de la clase, Marge y Lisa comparan sus diseños y se dan cuenta de que algo está terriblemente mal. Después de configurar apropiadamente su cuadrícula de manera que el Monumento quede en el centro, Marge encuentra que el Kwik-E-Mart está en la Calle 8 y la 5ª Avenida y la planta de energía nuclear está en la Calle 3 y la 5ª Avenida, como se muestra en la Figura 3.2a. Pero en el diseño de Lisa, las direcciones son completamente diferentes: el Kwik-E-Mart está cerca de la esquina de la calle 7 y la 3ª Avenida, mientras que la planta de energía está en la calle 4ª y la 7ª Avenida, como en la Figura 3.2b. Claramente, alguien ha cometido un error.

Después de pensarlo un momento, Lisa se da cuenta de lo que está pasando. No hay errores. Ella y Marge tienen razón. Simplemente eligieron diferentes orientaciones para sus calles y avenidas. Las calles y avenidas de Marge corren en un ángulo relativo al de Lisa; sus cuadrículas están rotadas en relación a las otras; han dividido a Springfield en calles y avenidas de dos maneras diferentes (ver Figura 3.2c). La lección aquí es simple, pero importante. Hay libertad en la forma en que Springfield -una región del espacio- puede organizarse por calles y avenidas. No hay calles o avenidas "absolutas". La elección de Marge es tan válida como la de Lisa, o cualquier otra orientación posible, para el caso.

Mantén esta idea en mente mientras pintamos el tiempo en el cuadro. Estamos acostumbrados a pensar en el espacio como la arena del universo, pero los procesos físicos ocurren en alguna región del espacio *durante algún intervalo de tiempo.* Como ejemplo, imaginemos que Itchy y Scratchy están teniendo un duelo, como se ilustra en la figura 3.3a, y los eventos se registran momento a momento a la manera de uno de esos viejos libros de hojalata. Cada página es un "trozo de tiempo" -como un fotograma de una película- que muestra lo que ocurrió en una región del espacio en un momento del tiempo. Para ver lo que ocurrió en un momento diferente del tiempo, se pasa a una página diferente.[4] (Por supuesto, el espacio es tridimensional mientras que las páginas son bidimensionales, pero hagamos esta simplificación para facilitar el pensamiento y el dibujo de las figuras. No comprometerá ninguna de nuestras conclusiones). A modo de terminología, una región del espacio considerada a lo largo de un intervalo de tiempo se

denomina región del espacio tiempo*; se* puede pensar en una región del espacio tiempo como un registro de todas las cosas que ocurren en alguna región del espacio durante un determinado lapso de tiempo.

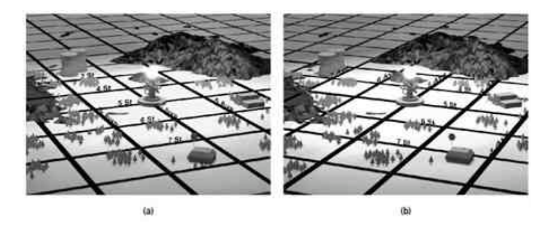


Figura 3.2 **(**a**)** El diseño de la calle de Marge. b**) El diseño de la calle de** Lisa.

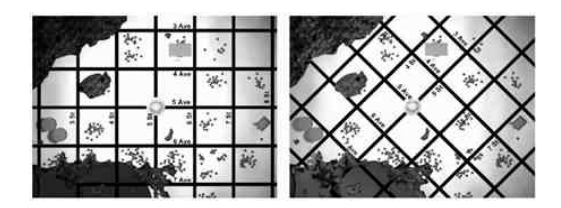


Figura 3.2 **(**c**) Vista general** de los diseños de las calles y avenidas de Marge y Lisa. Sus cuadrículas difieren por una rotación.

Ahora, siguiendo la visión del profesor de matemáticas de Einstein, Hermann Minkowski (que una vez llamó a su joven estudiante un perro perezoso), considera la región del espacio tiempo como una entidad en sí misma: considera el libro completo como un objeto por derecho propio. Para ello, imaginemos que, como en la Figura 3.3b, ampliamos la encuadernación del libro de bolsillo y luego imaginemos que, como en la Figura 3.3c, todas las páginas son completamente transparentes, de modo que cuando miramos el libro vemos un bloque continuo que contiene todos los eventos que ocurrieron durante un intervalo de tiempo determinado. Desde esta perspectiva, se debe pensar en las páginas como si simplemente ofrecieran una forma conveniente de organizar el contenido del bloque, es decir, de organizar los acontecimientos del espacio tiempo. Al igual que una cuadrícula de calles y avenidas nos permite especificar fácilmente las ubicaciones en una ciudad, dando su dirección de calle y avenida, la división del bloque de espacio-tiempo en páginas nos permite especificar fácilmente un evento (Itchy disparando su arma, Scratchy siendo alcanzado, y así sucesivamente) dando la hora en que ocurrió el evento -la página en la que aparece- y la ubicación dentro de la región del espacio representada en las páginas.

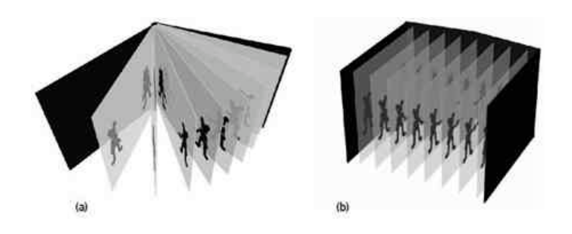


Figura 3.3 **(a) Libro de duelo**. b**) Libro de tiradas** con encuadernación expandida.

Aquí está el punto clave: Así como Lisa se dio cuenta de que hay diferentes formas igualmente válidas de dividir una región del espacio en calles y avenidas,



Figura 3.3 Bloque del espacio tiempo que contiene el duelo. Las páginas, o "rebanadas de tiempo", organizan los eventos del bloque. Los espacios entre los cortes son sólo para claridad visual; no pretenden sugerir que el tiempo es discreto, una cuestión que discutiremos más adelante.

Einstein se dio cuenta de que hay diferentes maneras, igualmente válidas, de cortar una región del espacio-tiempo -un bloque como el de la figura 3.3c- en regiones del espacio en momentos del tiempo. *Las páginas de las Figuras 3.3a, b y c -con*, de nuevo, cada página que denota un momento de tiempo- *proporcionan sólo uno de los muchos cortes posibles.* Esto puede sonar como una extensión menor de lo que sabemos intuitivamente sobre el espacio, pero es la base para anular algunas de las intuiciones más básicas que hemos mantenido durante miles de años. Hasta 1905, se pensaba que todo el mundo experimentaba el paso del tiempo de forma idéntica, que todo el mundo estaba de acuerdo en qué eventos ocurrían en un momento dado del tiempo, y por lo tanto, que todo el mundo estaba de acuerdo en lo que pertenecía a una página determinada del libro de la vuelta del espacio tiempo. Pero cuando Einstein se dio cuenta de que dos observadores en movimiento relativo tenían relojes que marcaban el tiempo de forma diferente, todo esto cambió. Los relojes que se mueven en movimiento relativo entre sí se desincronizan y por lo tanto dan diferentes nociones de simultaneidad. Cada página de la figura 3.3b no es más que la visión de un observador de los acontecimientos en el espacio que tienen lugar en un momento dado de su

tiempo. Otro observador, moviéndose en relación con el primero, declarará que los acontecimientos en una sola de estas páginas *no suceden* todos al mismo tiempo.

Esto se conoce como la *relatividad de la simultaneidad,* y podemos verlo directamente. Imaginemos que Itchy y Scratchy, pistolas en patas, están ahora enfrentados en los extremos opuestos de un largo vagón de tren en movimiento con un árbitro en el tren y otro oficiando desde el andén. Para que el duelo sea lo más justo posible, todas las partes han acordado renunciar a la regla de los tres pasos, y en su lugar, los duelistas desenfundarán cuando un pequeño montón de pólvora, colocado a mitad de camino entre ellos, explote. El primer árbitro, Apu, enciende la mecha, toma un sorbo de su refrescante Chutney Squishee, y da un paso atrás. La pólvora se enciende, y tanto Itchy como Scratchy desenfundan y disparan. Como Itchy y Scratchy están a la misma distancia de la pólvora, Apu está seguro de que la luz de la bengala los alcanza simultáneamente, así que levanta la bandera verde y declara que es un empate justo. Pero el segundo árbitro, Martin, que observaba desde la plataforma, grita salvajemente juego sucio, afirmando que Itchy recibió la señal luminosa de la explosión antes que Scratchy. Explica que como el tren se movía hacia adelante, Itchy se dirigía hacia la luz mientras que Scratchy se alejaba de ella. Esto significa que la luz no tenía que viajar tan lejos para llegar a Itchy, ya que él se acercaba a ella; además, la luz tenía que viajar más lejos para llegar a Scratchy, ya que él se alejaba de ella. Dado que la velocidad de la luz, moviéndose a la izquierda o a la derecha desde la perspectiva de cualquiera, es constante, Martin afirma que la luz tardó más tiempo en llegar a Scratchy ya que tuvo que viajar más lejos, lo que hace que el duelo sea injusto.

¿Quién tiene razón, Apu o Martin? La respuesta inesperada de Einstein es que ambos lo son. Aunque las conclusiones de nuestros dos árbitros difieren, las observaciones y el razonamiento de cada uno son impecables. Como el bate y la pelota, simplemente tienen diferentes perspectivas sobre la misma secuencia de eventos. Lo impactante que Einstein reveló es que sus diferentes perspectivas dan lugar a afirmaciones diferentes pero igualmente válidas de qué eventos suceden al mismo tiempo. Por supuesto, a velocidades diarias como la del tren, la disparidad es pequeña - Martin afirma que Scratchy recibió la luz menos de una trillonésima de segundo después de Itchy - pero si el tren se moviera más rápido, cerca de la velocidad de la luz, la diferencia de tiempo sería sustancial.

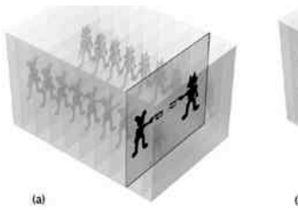
Piensa en lo que esto significa para las páginas del libro de visitas que cortan una región del espacio tiempo. Dado que los observadores que se mueven en relación con los demás no se ponen de acuerdo sobre lo que ocurre simultáneamente, la forma en que cada uno de ellos rebanará un bloque de espacio-tiempo en páginas -con cada página que contiene todos los eventos que ocurren en un momento dado desde la perspectiva de cada observador- tampoco estará de acuerdo. En su lugar, los observadores que se mueven en relación unos con otros cortan un bloque de espacio tiempo en páginas, en rebanadas de tiempo, de maneras

diferentes pero igualmente válidas. Lo que Lisa y Marge encontraron para el espacio, Einstein lo encontró para el espacio tiempo.

La inclinación de las rebanadas

La analogía entre las cuadrículas de las calles y avenidas y los cortes de tiempo se puede llevar aún más lejos. Así como los diseños de Marge y Lisa difieren por una rotación, los cortes de tiempo de Apu y Martin, sus páginas de libro, también difieren por una rotación, pero una que involucra tanto el espacio como el tiempo. Esto se ilustra en las figuras 3.4a y 3.4b, en las que vemos que los cortes de Martin están rotados en relación con los de Apu, lo que le lleva a concluir que el duelo fue injusto. Una diferencia crítica de detalle, sin embargo, es que mientras que el ángulo de rotación entre los esquemas de Marge y Lisa fue meramente una elección de diseño, el ángulo de rotación entre los cortes de Apu y Martin está determinado por su velocidad relativa. Con un mínimo esfuerzo, podemos ver por qué.

Imagina que Itchy y Scratchy se han reconciliado. En lugar de intentar dispararse mutuamente, sólo quieren asegurarse de que los relojes de la parte delantera y trasera del tren estén perfectamente sincronizados. Como todavía están equidistantes de la pólvora, se les ocurre el siguiente plan. Aceptan poner sus relojes al mediodía justo cuando ven la luz de la pólvora en llamas. Desde su perspectiva, la luz tiene que viajar la misma distancia para llegar a cualquiera de ellos, y como la velocidad de la luz es constante, los alcanzará simultáneamente. Pero, por el mismo razonamiento de antes, Martin y cualquiera que vea desde la plataforma dirá que Itchy se dirige hacia la luz emitida mientras que Scratchy se aleja de ella, por lo que Itchy recibirá la señal de luz un poco antes que Scratchy. Por lo tanto, los observadores de la plataforma concluirán que Itchy puso su reloj a las 12:00 *antes que Scratchy* y por lo tanto afirmarán que el reloj de Itchy está puesto un poco antes que el de Scratchy. Por ejemplo, para un observador de andén como Martin, cuando son las 12:06 en el reloj de Itchy, puede ser que sean sólo las 12:04 en el de Scratchy (los números precisos dependen de la longitud y la velocidad del tren; cuanto más largo y rápido sea, mayor será la discrepancia). Sin embargo, desde el punto de vista de Apu y de todos los que iban en el tren, Itchy y Scratchy realizaron la sincronización perfectamente. Una vez más, aunque es difícil de aceptar a nivel visceral, no hay ninguna paradoja aquí: *los observadores en movimiento relativo no se ponen de acuerdo sobre la simultaneidad, no se ponen de acuerdo sobre qué cosas suceden al mismo tiempo.*



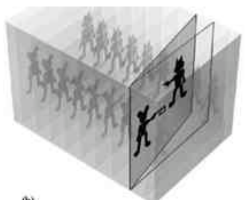


Figura 3.4 Cortes temporales según **)** Apu y b**)** Martin, que están en movimiento relativo. Sus cortes se diferencian por una rotación a través del espacio y el tiempo. Según Apu, que está en el tren, el duelo es justo; según Martin, que está en el andén, no lo es. Ambos puntos de vista son igualmente válidos. En el **punto** b**),** se enfatiza el diferente ángulo de sus cortes a través del espacio tiempo.

Esto significa que una página en el libro de vuelta, vista desde la perspectiva de los que están en el tren, una página que contiene eventos que ellos consideran simultáneos -como el que Itchy y Scratchy pongan sus relojes- contiene eventos que están en páginas *diferentes* desde la perspectiva de los que observan desde el andén (según los observadores del andén, Itchy puso su reloj *antes que el de* Scratchy, por lo que estos dos eventos están en páginas diferentes desde la perspectiva del observador del andén). Y ahí lo tenemos. Una sola página desde la perspectiva de los que están en el tren contiene eventos que están en páginas anteriores y posteriores de un observador del andén. Por eso los trozos de Martin y Apu de la figura 3.4 están rotados uno con respecto al otro: lo que es un único trozo de tiempo, desde una perspectiva, atraviesa muchos trozos de tiempo, desde la otra perspectiva.

Si la concepción de Newton del espacio y el tiempo absolutos fuera correcta, todo el mundo estaría de acuerdo en una sola porción del espacio tiempo. Cada porción representaría el espacio absoluto como se ve en un momento dado del tiempo absoluto. Sin embargo, así no es como funciona el mundo, y el cambio del rígido tiempo newtoniano a la recién descubierta flexibilidad einsteniana inspira un cambio en nuestra metáfora. En lugar de ver el espacio tiempo como un libro rígido, a veces será útil pensar en él como una enorme y fresca barra de pan. En lugar de las páginas fijas que componen un libro - las rebanadas de tiempo newtoniano fijo - piensa en la variedad de ángulos en los que puedes rebanar una barra en trozos de pan paralelos, como en la figura 3.5a. Cada trozo de pan representa el espacio en un momento del tiempo desde la perspectiva de un observador. Pero como se ilustra en la figura 3.5b, otro observador, moviéndose en relación con el primero, rebanará el pan del espacio tiempo en un ángulo diferente. Cuanto mayor sea la velocidad relativa de los dos observadores, mayor será el ángulo entre sus respectivos cortes paralelos (como se explica en las notas finales, el límite de velocidad establecido por la luz se traduce en un ángulo de rotación máximo de 45° para estos cortes [9]) y mayor será la discrepancia entre lo que los observadores informarán como sucedido en el mismo momento.

El cubo, según la Relatividad Especial

La relatividad del tiempo y el espacio requiere un cambio dramático en nuestro pensamiento. Sin embargo, hay un punto importante, mencionado anteriormente e ilustrado ahora por la hogaza de pan, que a menudo se pierde: *no todo en la relatividad es relativo.* Incluso si usted y yo nos imagináramos cortando una barra de pan de dos maneras diferentes, todavía hay algo en lo que estaríamos totalmente de acuerdo: la totalidad de la barra en sí. Aunque nuestras rebanadas sean diferentes, si yo me imagino juntando todas mis rebanadas y tú te imaginas haciendo lo mismo con todas las tuyas, reconstituiríamos la misma hogaza de pan. ¿Cómo podría ser de otra manera? Ambos imaginamos que cortábamos la misma barra de pan.

Del mismo modo, la totalidad de todos los trozos de espacio en momentos sucesivos de tiempo, desde la perspectiva de cualquier observador individual (véase la figura 3.4), producen colectivamente la misma región de espacio tiempo. Diferentes observadores cortan una región del espaciotiempo de diferentes maneras, pero la región en sí misma, como la hogaza de pan, tiene una existencia independiente. Así pues, aunque Newton se equivocó definitivamente, su intuición de que había algo absoluto, algo en lo que todo el mundo estaría de acuerdo, no se vio totalmente desacreditada por la relatividad especial. El espacio absoluto no existe. El tiempo absoluto no existe. Pero de acuerdo con la relatividad especial, el espacio tiempo absoluto sí existe. Con esta observación, vamos a visitar el cubo una vez más.

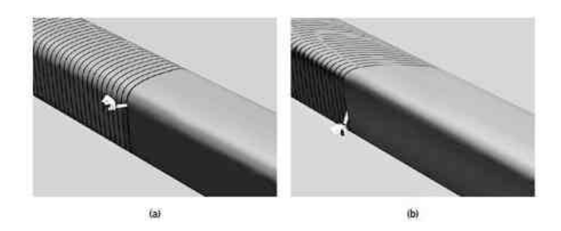


Figura 3.5 Al igual que una barra de pan puede cortarse en diferentes ángulos, un bloque de espacio-tiempo es "cortado en rodajas" en diferentes ángulos por los observadores en movimiento relativo. Cuanto mayor sea la velocidad relativa, mayor será el ángulo (con un ángulo máximo de 45 correspondiente a la velocidad máxima fijada por la luz).

En un universo por lo demás vacío, ¿con respecto a *qué* está girando el cubo? Según Newton, la respuesta es el espacio absoluto. Según Mach, no hay ningún sentido en el que se pueda decir que el cubo gira. Según la relatividad especial de Einstein, la respuesta es el espacio tiempo absoluto.

Para entender esto, veamos de nuevo los diseños de calles y avenidas propuestos para Springfield. Recuerden que Marge y Lisa no estaban de acuerdo en la

dirección de la calle y la avenida del Kwik-E-Mart y de la planta nuclear porque sus cuadrículas estaban rotadas en relación a las otras. Aún así, independientemente de cómo cada una eligió el diseño de la red, hay algunas cosas en las que definitivamente siguen estando de acuerdo. Por ejemplo, si en el interés de aumentar la eficiencia de los trabajadores durante la hora del almuerzo, se pinta un sendero en el suelo desde la planta nuclear directamente al Kwik-E-Mart, Marge y Lisa no estarán de acuerdo en las calles y avenidas por las que pasa el sendero, como se puede ver en la Figura 3.6. Pero ciertamente estarán de acuerdo en la *forma del sendero*: estarán de acuerdo en que es una línea recta. La forma geométrica del sendero pintado es independiente de la cuadrícula particular de la calle o la avenida que se utiliza.

Einstein se dio cuenta de que algo similar se aplica al espacio tiempo. Aunque dos observadores en movimiento relativo dividen el espacio tiempo de diferentes maneras, hay cosas en las que todavía están de acuerdo. Como ejemplo principal, considera una línea recta no sólo a través del espacio, sino a través del espacio tiempo. Aunque la inclusión del tiempo hace que tal trayectoria sea menos familiar, el pensamiento de un momento revela su significado. Para que la trayectoria de un objeto a través del espacio tiempo sea recta, el objeto no sólo debe moverse en línea recta a través del espacio, sino que su movimiento debe ser uniforme a través del tiempo; es decir, tanto su velocidad como su dirección deben ser invariables y, por lo tanto, debe moverse con una velocidad constante. Ahora bien, aunque diferentes observadores corten el pan del espacio tiempo en diferentes ángulos y, por lo tanto, no se pongan de acuerdo sobre cuánto tiempo ha transcurrido o cuánta distancia se cubre entre varios puntos de una trayectoria, tales observadores, como Marge y Lisa, seguirán estando de acuerdo sobre si una trayectoria a través del espacio tiempo es una línea recta. Así como la forma geométrica de la trayectoria pintada hacia el Kwik-E-Mart es independiente del corte de la calle/avenida que uno utiliza, así también las formas geométricas de las trayectorias en el espacio tiempo son independientes del corte de tiempo que uno utiliza.[10]

Se trata de una realización simple pero crítica, porque con ella la relatividad especial proporcionó un criterio absoluto -uno en el que todos los observadores, independientemente de sus velocidades relativas constantes, estarían de acuerdo- para decidir si algo se está acelerando o no. Si la trayectoria que sigue un objeto a través del espacio tiempo es una línea recta, como la del astronauta en suave reposo (a) de la figura 3.7, no se está acelerando. Si la trayectoria que sigue un objeto tiene cualquier otra forma que no sea una línea recta a través del espacio tiempo, se *está acelerando*. Por ejemplo, si el astronauta enciende su propulsor y vuela en círculo una y otra vez, como el astronauta (b) de la figura 3.7, o si sale hacia el espacio profundo a una velocidad cada vez mayor, como el astronauta (c), su trayectoria a través del espacio tiempo será curva, lo que indica aceleración. Y así, con estos desarrollos aprendemos que las *formas geométricas de las trayectorias en el espacio tiempo proporcionan el estándar absoluto que determina*

si algo se está acelerando. El espacio-tiempo, no sólo el espacio, proporciona el punto de referencia.

Figura 3.6 Independientemente de la cuadrícula de la calle, todo el mundo está de acuerdo en la forma de un sendero, en este caso, una línea recta.

En este sentido, entonces, la relatividad especial nos dice que el propio espacio tiempo es el árbitro último del movimiento acelerado. El espacio tiempo proporciona el telón de fondo con respecto al cual se puede decir que algo, como un cubo giratorio, se acelera incluso en un universo por lo demás vacío. Con esta idea, el péndulo volvió a oscilar: de Leibniz el relacionista a Newton el absolutista a Mach el relacionista, y ahora de vuelta a Einstein, cuya relatividad especial mostró una vez más que el ámbito de la realidad -vista como espacio tiempo, no como espacio- *es algo* suficiente para proporcionar el punto de referencia definitivo para el movimiento. [11]

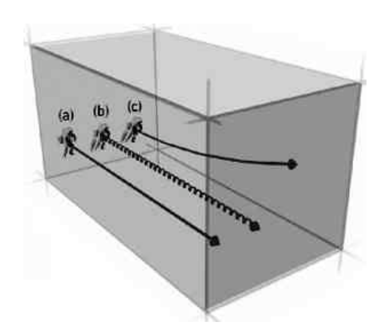


Figura 3.7 Los caminos a través del espacio tiempo seguidos por tres astronautas. El astronauta a) no acelera y por lo tanto sigue una línea recta a través del espacio tiempo. El astronauta b) vuela repetidamente en círculo, por lo que sigue una espiral a través del espacio tiempo. El astronauta (c) acelera hacia el espacio profundo, y así sigue otra trayectoria curva en el espacio tiempo.

La gravedad y la vieja cuestión

En este punto se podría pensar que hemos llegado al final de la historia del cubo, con las ideas de Mach desacreditadas y la actualización radical de Einstein de las concepciones absolutas de Newton sobre el espacio y el tiempo que han ganado el día. La verdad, sin embargo, es más sutil y más interesante. Pero si eres nuevo en las ideas que hemos cubierto hasta ahora, puede que necesites un descanso antes de seguir con las últimas secciones de este capítulo. En la tabla 3.1 encontrarás un resumen para refrescarte la memoria cuando te prepares para volver a trabajar.

Bien. Si estás leyendo estas palabras, deduzco que estás listo para el próximo gran paso en la historia del espacio tiempo, un paso catalizado en gran parte por nada menos que Ernst Mach. Aunque la relatividad especial, a diferencia de la teoría de Mach, concluye que incluso en un universo por lo demás vacío te

sentirías presionado contra la pared interior de un cubo giratorio y que la cuerda atada entre dos rocas giratorias se tensaría, Einstein quedó profundamente fascinado por las ideas de Mach. Se dio cuenta, sin embargo, que la consideración seria de estas ideas requería extenderlas significativamente. Mach nunca especificó realmente un mecanismo por el cual las estrellas distantes y otra materia del universo pudieran jugar un papel en la fuerza con la que tus brazos se abren hacia afuera cuando giras o en la fuerza con la que te sientes presionado contra la pared interna de un cubo giratorio. Einstein comenzó a sospechar que si existiera tal mecanismo podría tener algo que ver con la gravedad.

Esta realización tenía un atractivo particular para Einstein porque en la relatividad especial, para mantener el análisis manejable, había ignorado completamente la gravedad.

Newton	Space is an entity; accelerated motion is not relative; absolutist position.
Leibniz	Space is not an entity; all aspects of motion are relative; relationist position.
Mach	Space is not an entity; accelerated motion is relative to average mass distribution in the universe; relationist position.
Einstein (Special Relativity)	Space and time are individually relative; space-time is an absolute entity.

Table 3.1 A summary of various positions on the nature of space and spacetime.

Tal vez, especuló, una teoría más robusta, que abarcara tanto la relatividad especial como la gravedad, llegaría a una conclusión diferente respecto a las ideas de Mach. Tal vez, supuso, una generalización de la relatividad especial que incorporara la gravedad mostraría que la materia, tanto de cerca como de lejos, determina la fuerza que sentimos cuando aceleramos.

Einstein también tenía una segunda razón, algo más apremiante, para dirigir su atención a la gravedad. Se dio cuenta de que la relatividad especial, con su dictado central de que la velocidad de la luz es la más rápida que cualquier cosa o cualquier perturbación puede viajar, estaba en conflicto directo con la ley universal de la gravedad de Newton, el monumental logro que durante más de doscientos años había predicho con fantástica precisión el movimiento de la luna, los planetas, cometas y todas las cosas que se lanzaban hacia el cielo. A pesar del éxito experimental de la ley de Newton, Einstein se dio cuenta de que, según Newton, la gravedad ejerce su influencia de un lugar a otro, del sol a la tierra, de la tierra a la luna, de cualquiera -aquí a cualquiera- allí, instantáneamente, en poco tiempo, *mucho más rápido que la luz.* Y eso contradijo directamente la relatividad especial.

Para ilustrar la contradicción, imagina que has tenido una noche realmente decepcionante (el club de pelota de tu ciudad perdió, nadie recordó tu cumpleaños, alguien se comió el último trozo de Velveeta) y necesitas un poco de tiempo a solas, así que tomas el bote familiar para un relajante paseo en bote a

medianoche. Con la luna encima, el agua está en marea alta (es la gravedad de la luna que tira de las masas de agua lo que crea las mareas), y los hermosos reflejos de la luz de la luna bailan en su superficie ondulante. Pero entonces, como si su noche no hubiera sido ya suficientemente irritante, alienígenas hostiles sacuden la luna y la transportan claramente al otro lado de la galaxia. Ahora, ciertamente, la repentina desaparición de la luna sería extraña, pero si la ley de la gravedad de Newton era correcta, el episodio demostraría algo aún más extraño. La ley de Newton predice que el agua comenzaría a retroceder de la marea alta, debido a la pérdida de la atracción gravitacional de la luna, alrededor de un segundo y medio *antes de* ver la luna desaparecer del cielo. *Como un velocista saltando el arma, el agua parecería retroceder un segundo y medio* demasiado pronto.

La razón es que, según Newton, en el mismo momento en que la luna desaparece, su atracción gravitatoria también desaparecería *instantáneamente*, y sin la gravedad de la luna, las mareas empezarían a disminuir inmediatamente. Sin embargo, como la luz tarda un segundo y medio en recorrer el cuarto de millón de millas entre la luna y la tierra, no se vería inmediatamente que la luna ha desaparecido; durante un segundo y medio, parecería que las mareas se retiraban de una luna que todavía brillaba en lo alto como de costumbre. Así, según el enfoque de Newton, la gravedad puede afectarnos antes de que la gravedad de la luz pueda superar a la luz, y esto, Einstein estaba seguro, estaba equivocado.[12]

Y así, alrededor de 1907, Einstein se obsesionó con el objetivo de formular una nueva teoría de la gravedad, una que fuera al menos tan precisa como la de Newton pero que no entrara en conflicto con la teoría especial de la relatividad. Esto resultó ser un desafío más allá de todos los demás. El formidable intelecto de Einstein finalmente había encontrado su pareja. Su cuaderno de este período está lleno de ideas a medio formular, casi perdidas en las que pequeños errores resultaron en largos viajes por caminos espurios, y exclamaciones de que había resuelto el problema sólo para darse cuenta poco después de que había cometido otro error. Finalmente, para 1915, Einstein emergió a la luz. Aunque Einstein tuvo ayuda en momentos críticos, sobre todo del matemático Marcel Grossmann, el descubrimiento de la *relatividad general* fue la rara lucha heroica de una sola mente para dominar el universo. El resultado es la joya de la corona de la física precuántica.

El viaje de Einstein hacia la relatividad general comenzó con una pregunta clave que Newton, de forma bastante tímida, había eludido dos siglos antes. ¿Cómo ejerce la gravedad su influencia sobre inmensas extensiones de espacio? ¿Cómo afecta el vasto y distante sol al movimiento de la Tierra? El sol no toca la tierra, así que ¿cómo lo hace? En resumen, ¿cómo hace la gravedad el trabajo? Aunque Newton descubrió una ecuación que describía el efecto de la gravedad con gran precisión, reconoció plenamente que había dejado sin respuesta la importante pregunta de cómo funciona realmente la gravedad. En sus *Principios,* Newton

escribió irónicamente, "Dejo este problema a la consideración del lector". [13] Como se puede ver, hay una similitud entre este problema y el que Faraday y Maxwell resolvieron en el siglo XIX, usando la idea de un campo magnético, respecto a la forma en que un imán ejerce influencia sobre cosas que no toca literalmente. Así que podrías sugerir una respuesta similar: la gravedad ejerce su influencia por otro campo, el campo gravitacional. Y, en términos generales, esta es la sugerencia correcta. Pero realizar esta respuesta de una manera que no entre en conflicto con la relatividad especial es más fácil decirlo que hacerlo.

Mucho más fácil. Fue a esta tarea a la que Einstein se dedicó audazmente, y con el deslumbrante marco que desarrolló después de casi una década de búsqueda en la oscuridad, Einstein derrocó la venerada teoría de la gravedad de Newton. Lo que es igualmente deslumbrante, la historia cierra el círculo porque el avance clave de Einstein estaba estrechamente relacionado con el mismo tema que Newton destacó con el cubo: ¿Cuál es la verdadera naturaleza del movimiento acelerado?

La equivalencia de la gravedad y la aceleración

En la relatividad especial, el enfoque principal de Einstein fue en los observadores que se mueven con velocidad constante -observadores que no sienten ningún movimiento y por lo tanto están todos justificados en proclamar que son estacionarios y que el resto del mundo se mueve por ellos. Itchy, Scratchy y Apu en el tren no sienten ningún movimiento. Desde su perspectiva, son Martin y todos los demás en la plataforma los que se mueven. Martin tampoco siente ningún movimiento. Para él, son el tren y sus pasajeros los que están en movimiento. Ninguna de las dos perspectivas es más correcta que la otra. Pero el movimiento acelerado es diferente, porque se *puede* sentir. Te sientes apretado en un asiento de coche mientras acelera hacia adelante, te sientes empujado hacia los lados cuando un tren toma una curva cerrada, te sientes presionado contra el piso de un ascensor que acelera hacia arriba.

Sin embargo, las fuerzas que sentirías le resultaron muy familiares a Einstein. Al acercarse a una curva cerrada, por ejemplo, su cuerpo se tensa al prepararse para el empuje lateral, porque la fuerza inminente es inevitable. No hay manera de protegerse de su influencia. La única manera de evitar la fuerza es cambiar tus planes y no tomar la curva. Esto hizo sonar una fuerte campana para Einstein. Reconoció que exactamente los mismos rasgos caracterizan a la fuerza gravitatoria. Si estás parado en el planeta Tierra estás sujeto a la atracción gravitacional del planeta Tierra. Es inevitable. No hay manera de evitarlo. Aunque puedes protegerte de las fuerzas electromagnéticas y nucleares, no hay forma de protegerte de la gravedad. Y un día en 1907, Einstein se dio cuenta de que esto no era una mera analogía. En uno de esos destellos de perspicacia que los

científicos pasan toda su vida anhelando, Einstein se dio cuenta de que la gravedad y el movimiento acelerado son dos caras de la misma moneda.

Así como al cambiar su movimiento planeado (para evitar acelerar) puede evitar sentirse apretado en su asiento del coche o sentirse empujado de lado en el tren, Einstein comprendió que al cambiar adecuadamente su movimiento también puede evitar sentir las sensaciones habituales asociadas con la atracción de la gravedad. La idea es maravillosamente simple. Para entenderlo, imaginen que Barney está tratando desesperadamente de ganar el Desafío de Springfield, una competencia de un mes entre todos los machos de tamaño de cinturón para ver quién puede perder el mayor número de pulgadas. Pero después de dos semanas de dieta líquida (Cerveza Duff), cuando todavía tiene una vista obstruida de la báscula del baño, pierde toda esperanza. Y así, en un ataque de frustración, con la balanza pegada a sus pies, salta desde la ventana del baño. En su camino hacia abajo, justo antes de caer en la piscina de su vecino, Barney mira la lectura de la balanza y ¿qué es lo que ve? Bueno, Einstein fue la primera persona que se dio cuenta, y se dio cuenta completamente, que Barney vería la lectura de la balanza caer a cero. La escala cae exactamente a la misma velocidad que Barney, así que sus pies no se presionan contra ella en absoluto. *En caída libre, Barney experimenta la misma ingravidez que los astronautas en el espacio exterior.*

En efecto, si imaginamos que Barney salta por su ventana a un gran pozo del que se ha evacuado todo el aire, entonces en su camino hacia abajo no sólo se eliminaría la resistencia del aire, sino que como cada átomo de su cuerpo caería exactamente al mismo ritmo, todas las tensiones y esfuerzos corporales externos habituales -sus pies empujando contra sus tobillos, sus piernas empujando en sus caderas, sus brazos tirando hacia abajo en sus hombros- también serían eliminados. [14] Al cerrar los ojos durante el descenso, Barney sentiría exactamente lo que sentiría si estuviera flotando en la oscuridad del espacio profundo. (Y, de nuevo, en caso de ser más feliz con ejemplos no humanos: si deja caer dos rocas atadas por una cuerda en el pozo evacuado, la cuerda permanecerá floja, como lo haría si las rocas estuvieran flotando en el espacio exterior). Así, al cambiar su estado de movimiento, al "ceder totalmente a la gravedad", Barney es capaz de simular un ambiente libre de gravedad. (De hecho, la NASA entrena a los astronautas para el entorno libre de gravedad del espacio exterior haciéndolos viajar en un avión 707 modificado, apodado el Cometa *Vómito,* que periódicamente entra en un estado de caída libre hacia la tierra).

Del mismo modo, mediante un cambio adecuado en el movimiento se puede crear una fuerza que es esencialmente idéntica a la gravedad. Por ejemplo, imaginemos que Barney se une a los astronautas flotando ingrávidos en su cápsula espacial, con la báscula del baño todavía pegada a sus pies y todavía leyendo el cero. Si la cápsula enciende sus impulsores y acelera, las cosas cambiarán significativamente. Barney se sentirá presionado al suelo de la cápsula, igual que tú te sientes presionado al suelo de un ascensor de aceleración. Y como los pies

de Barney están ahora presionando contra la escala, su lectura ya no es cero. Si el capitán dispara los impulsores con la fuerza adecuada, la lectura de la escala coincidirá precisamente con lo que Barney vio en el baño. A través de la aceleración apropiada, Barney está experimentando ahora una fuerza que es indistinguible de la gravedad.

Lo mismo ocurre con otros tipos de movimiento acelerado. Si Barney se une a Homero en el cubo del espacio exterior y, mientras el cubo gira, se coloca en ángulo recto con Homero, con los pies y la balanza contra la pared interior del cubo, la balanza registrará una lectura distinta de cero, ya que sus pies se presionarán contra ella. Si el cubo gira a la velocidad correcta, la balanza dará la misma lectura que Barney encontró antes en el baño: la aceleración del cubo giratorio también puede simular la gravedad de la Tierra.

Todo esto llevó a Einstein a concluir que la fuerza que uno siente por la gravedad y la fuerza que uno siente por la aceleración son iguales. Son equivalentes. Einstein llamó a esto el *principio de equivalencia.*

Echa un vistazo a lo que significa. Ahora mismo sientes la influencia de la gravedad. Si estás de pie, tus pies sienten el suelo soportando tu peso. Si estás sentado, sientes el apoyo en otro lugar. Y a menos que estés leyendo en un avión o en un coche, probablemente también pienses que estás parado, que no estás acelerando o ni siquiera moviéndote. Pero según Einstein, en realidad estás acelerando. Ya que estás sentado, esto suena un poco tonto, pero no te olvides de hacer la pregunta habitual: ¿Acelerar de acuerdo a qué punto de referencia? ¿Acelerar desde el punto de vista de quién?

Con la relatividad especial, Einstein proclamó que el espacio tiempo absoluto proporciona el punto de referencia, pero la relatividad especial no tiene en cuenta la gravedad. Luego, a través del principio de equivalencia, Einstein proporcionó un punto de referencia más robusto que sí incluye los efectos de la gravedad. Y esto supuso un cambio radical de perspectiva. Dado que *la gravedad y la aceleración son equivalentes, si sientes la influencia de la gravedad, debes estar acelerando.* Einstein sostuvo que sólo los observadores que no sienten ninguna fuerza en absoluto -incluida la fuerza de la gravedad- están justificados para declarar que no están acelerando. Esos observadores sin fuerza proporcionan los verdaderos puntos de referencia para debatir el movimiento, y es este reconocimiento el que requiere un giro importante en la forma en que solemos pensar sobre esas cosas. Cuando Barney salta de su ventana al pozo evacuado, normalmente lo describiríamos como acelerando hacia la superficie terrestre. Pero esta no es una descripción con la que Einstein estaría de acuerdo. Según Einstein, Barney *no* está acelerando. *No* siente ninguna fuerza. Es ingrávido. *Se* siente como si estuviera flotando en la profunda oscuridad del espacio vacío. *Él* proporciona el estándar contra el cual todo movimiento debe ser comparado. Y por esta comparación, cuando estás leyendo tranquilamente en casa, estás acelerando.

Desde la perspectiva de Barney, mientras cae libremente junto a tu ventana -la perspectiva, según Einstein, de un verdadero punto de referencia para el movimiento-, tú y la Tierra y todas las demás cosas que normalmente pensamos como estacionarias se están acelerando *hacia arriba.* Einstein argumentaría que fue la cabeza de Newton la que se aceleró para encontrarse con la manzana, y no al revés.

Claramente, esta es una forma radicalmente diferente de pensar en el movimiento. Pero está anclada en el simple reconocimiento de que sientes la influencia de la gravedad sólo cuando te resistes a ella. Por el contrario, cuando te rindes completamente a la gravedad no la sientes. Suponiendo que no estás sujeto a ninguna otra influencia (como la resistencia del aire), cuando cedes a la gravedad y te dejas caer libremente, te sientes como si estuvieras flotando libremente en el espacio vacío, una perspectiva que, sin duda, consideramos que no está acelerada.

En resumen, sólo los individuos que flotan libremente, independientemente de si se encuentran en las profundidades del espacio exterior o en un curso de colisión con la superficie terrestre, están justificados al afirmar que no experimentan ninguna aceleración. Si pasas por delante de un observador de este tipo y hay una aceleración relativa entre los dos, entonces, según Einstein, estás acelerando.

De hecho, noten que ni Itchy, ni Scratchy, ni Apu, ni Martin tenían razón al decir que estaba parado durante el duelo, ya que todos sintieron la atracción de la gravedad hacia abajo. Esto no tiene ninguna relación con nuestra discusión anterior, porque allí, sólo nos preocupaba el movimiento horizontal, movimiento que no se veía afectado por la gravedad vertical experimentada por todos los participantes. Pero como punto importante de principio, el vínculo que Einstein encontró entre la gravedad y la aceleración significa, una vez más, que sólo estamos justificados al considerar estacionarios a aquellos observadores que *no* sienten ninguna fuerza.

Habiendo forjado el vínculo entre la gravedad y la aceleración, Einstein estaba listo para aceptar el desafío de Newton y buscar una explicación de cómo la gravedad ejerce su influencia.

Alabeos, curvas y gravedad

A través de la relatividad especial, Einstein mostró que cada observador corta el espacio tiempo en rebanadas paralelas que considera que son todo el espacio en instantes sucesivos de tiempo, con el giro inesperado de que los observadores que se mueven en relación unos con otros a velocidad constante cortarán el espacio tiempo en diferentes ángulos. Si uno de esos observadores comenzara a acelerar, se podría suponer que los cambios de momento a momento en su

velocidad y/o dirección de movimiento darían lugar a cambios de momento en el ángulo y la orientación de sus cortes. En términos generales, esto es lo que sucede. Einstein (utilizando las ideas geométricas articuladas por Carl Friedrich Gauss, Georg Bernhard Riemann y otros matemáticos en el siglo XIX) desarrolló esta idea, por ajustes y comienzos, y demostró que los cortes de ángulo diferente a través del pan de espacio tiempo se fusionan suavemente en rodajas que son *curvas* pero que encajan tan perfectamente como cucharas en una bandeja de plata, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 3.8. *Un observador acelerad*o talla rebanadas *espaciales que están deformadas.*

Con esta idea, Einstein fue capaz de invocar el principio de equivalencia con un profundo efecto. Dado que la gravedad y la aceleración son equivalentes, Einstein comprendió que la gravedad en sí misma no debe ser más que deformaciones y curvas en el tejido del espacio tiempo. Veamos lo que esto significa.

Si haces rodar una canica a lo largo de un suelo de madera liso, viajará en línea recta. Pero si recientemente has tenido una terrible inundación y el suelo se ha secado con todo tipo de golpes y deformaciones, una canica rodante ya no viajará por el mismo camino. En su lugar, se guiará de un lado a otro por las deformaciones y curvas de la superficie del suelo. Einstein aplicó esta simple idea al tejido del universo. Imaginó que en ausencia de materia o energía, sin sol, sin tierra, sin estrellas, el espacio y el tiempo, como el liso suelo de madera, no tiene alabeos ni curvas. Es plano. Esto se ilustra esquemáticamente en la figura 3.9a, en la que nos centramos en un trozo de espacio. Por supuesto, el espacio es realmente tridimensional, y por lo tanto la Figura 3.9b es una representación más precisa, pero los dibujos que ilustran dos dimensiones son más fáciles de entender, así que continuaremos usándolos. Einstein imaginó entonces que la presencia de la materia o la energía tiene un efecto en el espacio muy parecido al efecto que tuvo la inundación en el suelo. La materia y la energía, como el sol, causan que el espacio (y el espaciotiempo [5]) se deforme y se curve, como se ilustra en las figuras 3.10a y 3.10b. Y al igual que una canica que rueda sobre el suelo combado viaja por una trayectoria curva, Einstein mostró que cualquier cosa que se mueva a través del espacio combado - como la tierra que se mueve en las cercanías del sol - viajará por una trayectoria curva, como se ilustra en las figuras 3.11a y 3.11b.

Es como si la materia y la energía imprimieran una red de canaletas y valles a lo largo de los cuales los objetos son guiados por la mano invisible del tejido del espacio tiempo. Así, según Einstein, es como la gravedad ejerce su influencia. La misma idea también se aplica más cerca de casa. Ahora mismo, a tu cuerpo le gustaría deslizarse por una hendidura en el tejido espacio-tiempo causada por la presencia de la Tierra. Pero tu movimiento está siendo bloqueado por la superficie en la que estás sentado o de pie. El empuje hacia arriba que sientes en casi todos los momentos de tu vida, ya sea desde el suelo, el piso de tu casa, el sillón de la esquina o tu cama de tamaño real, actúa para evitar que te deslices por un valle

en el espacio tiempo. Por el contrario, si te tiras del trampolín alto, estás cediendo a la gravedad al permitir que tu cuerpo se mueva libremente por uno de sus toboganes espacio-temporales.

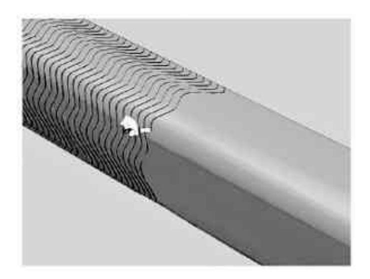


Figura 3.8 Según la relatividad general, no sólo el pan del espacio tiempo será cortado en el espacio en momentos de tiempo en diferentes ángulos (por observadores en movimiento relativo), sino que los cortes mismos serán deformados o curvados por la presencia de materia o energía.

Las figuras 3.9, 3.10 y 3.11 ilustran esquemáticamente el triunfo de la lucha de diez años de Einstein. Gran parte de su trabajo durante estos años tuvo como objetivo determinar la forma y el tamaño precisos de la deformación que sería causada por una cantidad dada de materia o energía. El resultado matemático que Einstein encontró subyace en estas figuras y está incorporado en lo que se llaman las ecuaciones de *campo de Einstein.* Como su nombre indica, Einstein veía la deformación del espacio tiempo como la manifestación -la encarnación geométrica- de un campo gravitatorio. Al enmarcar el problema geométricamente,

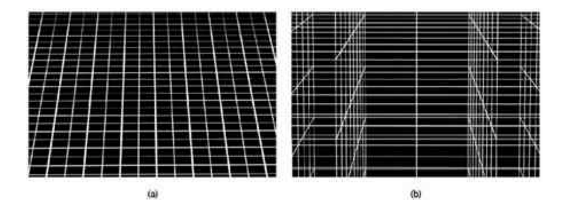


Figura 3.9 **(** a **)** Espacio plano (versión 2-d). **Espacio plano (versión** 3-d).

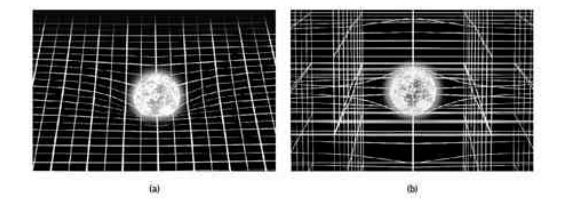


Figura 3.10 **(** a **)** El espacio deformado por el sol (versión 2-d).El espacio de deformación del sol (versión 3-d).

Einstein fue capaz de encontrar ecuaciones que hacen para la gravedad lo que las ecuaciones de Maxwell hicieron para el electromagnetismo. [16] Y usando estas ecuaciones, Einstein y muchos otros hicieron predicciones sobre el camino que seguiría este o aquel planeta, o incluso la luz emitida por una estrella distante, a medida que se mueve a través del espacio tiempo curvo. No sólo se han confirmado estas predicciones con un alto nivel de precisión, sino que en competencia directa con las predicciones de la teoría de Newton, la teoría de Einstein coincide consistentemente con la realidad con una fidelidad más fina.

De igual importancia, dado que la relatividad general especifica el mecanismo detallado por el que funciona la gravedad, proporciona un marco matemático para determinar la rapidez con la que transmite su influencia. La velocidad de transmisión se reduce a la cuestión de cuán rápido puede cambiar la forma del espacio en el tiempo. Es decir, ¿con qué rapidez pueden las deformaciones y las ondulaciones, como las de la superficie de un estanque, causadas por un guijarro en caída libre, correr de un lugar a otro a través del espacio? Einstein fue capaz de resolver esto, y la respuesta a la que llegó fue enormemente gratificante. Descubrió que las deformaciones y las ondulaciones, es decir, la gravedad, no viajan de un lugar a otro instantáneamente, como lo hacen en los cálculos newtonianos de la gravedad. En su lugar, *viajan exactamente a la velocidad de la luz.* Ni un poco más rápido ni más lento, totalmente de acuerdo con el límite de velocidad establecido por la relatividad especial. Si los alienígenas sacaran a la luna de su órbita, las mareas retrocederían un segundo y medio después, en el mismo momento exacto en que veríamos que la luna se había desvanecido. Donde la teoría de Newton falló, la relatividad general de Einstein prevaleció.

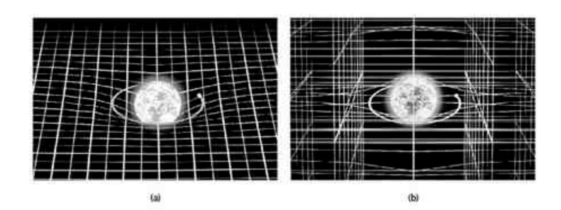


Figura 3.11 La Tierra se mantiene en órbita alrededor del sol porque sigue las curvas del tejido espacio-tiempo causadas por la presencia del sol.2-d. 3-D.

La Relatividad General y el Cubo

Además de dar al mundo una teoría de la gravedad matemáticamente elegante, conceptualmente poderosa y, por primera vez, completamente consistente, la teoría general de la relatividad también reformó completamente nuestra visión del espacio y el tiempo. Tanto en la concepción de Newton como en la de la relatividad especial, el espacio y el tiempo proporcionaron un escenario inalterable

para los acontecimientos del universo. Aunque el corte del cosmos en el espacio en momentos sucesivos tiene una flexibilidad en la relatividad especial insondable en la época de Newton, el espacio y el tiempo no responden a los acontecimientos del universo. El espacio tiempo, el pan, como lo hemos estado llamando, se toma como un hecho, de una vez por todas. En la relatividad general, todo esto cambia. El espacio y el tiempo se convierten en actores del cosmos en evolución. Cobran vida. La materia de aquí causa que el espacio se deforme allí, que la materia de allá se mueva, que el espacio de allá se deforme aún más, y así sucesivamente. La relatividad general proporciona la coreografía para una danza cósmica entrelazada de espacio, tiempo, materia y energía.

Este es un desarrollo impresionante. Pero ahora volvemos a nuestro tema central: ¿Qué pasa con el cubo? ¿Proporciona la relatividad general la base física de las ideas relacionistas de Mach, como esperaba Einstein?

A lo largo de los años, esta cuestión ha generado mucha controversia. Inicialmente, Einstein pensó que la relatividad general incorporaba plenamente la perspectiva de Mach, un punto de vista que consideraba tan importante que lo bautizó como *el principio de Mach.* De hecho, en 1913, mientras Einstein trabajaba furiosamente para poner en su lugar las últimas piezas de la relatividad general, escribió a Mach una carta entusiasta en la que describía cómo la relatividad general confirmaría el análisis de Mach del experimento del cubo de Newton. [17] Y en 1918, cuando Einstein escribió un artículo enumerando las tres ideas esenciales detrás de la relatividad general, el tercer punto de su lista era el principio de Mach. Pero la relatividad general es sutil y tiene características que tomaron muchos años para que los físicos, incluyendo al propio Einstein, la apreciaran completamente. A medida que estos aspectos se comprendían mejor, Einstein encontró cada vez más difícil incorporar plenamente el principio de Mach en la relatividad general. Poco a poco, se desilusionó de las ideas de Mach y en los últimos años de su vida llegó a renunciar a ellas. [18]

Con medio siglo adicional de investigación y retrospectiva, podemos considerar de nuevo el grado en que la relatividad general se ajusta al razonamiento de Mach. Aunque todavía hay alguna controversia, creo que la afirmación más precisa es que en algunos aspectos la relatividad general tiene un sabor claramente machiano, pero no se ajusta a la perspectiva totalmente relacionalista que Mach defendía. Esto es lo que quiero decir.

Mach argumentó [19] que cuando la superficie del agua que gira se vuelve cóncava, o cuando se siente que los brazos se extienden hacia afuera, o cuando la cuerda atada entre las dos rocas se tensa, esto no tiene nada que ver con alguna noción hipotética -y, en su opinión, completamente equivocada- del espacio absoluto (o del espacio tiempo absoluto, en nuestra comprensión más moderna). En cambio, argumentó que es una prueba de movimiento acelerado con respecto a toda la materia que se extiende por todo el cosmos. Si no hubiera materia, no habría

noción de aceleración y ninguno de los efectos físicos enumerados (agua cóncava, brazos separados, cuerdas tirando con fuerza) ocurriría.

¿Qué dice la relatividad general?

Según la relatividad general, los puntos de referencia de todo movimiento, y del movimiento acelerado en particular, son los observadores en caída libre, es decir, observadores que se han rendido completamente a la gravedad y no son actuados por ninguna otra fuerza. Ahora bien, un punto clave es que la fuerza gravitatoria a la que un observador en caída libre consiente surge de toda la materia (y la energía) esparcida por todo el cosmos. La Tierra, la Luna, los planetas distantes, las estrellas, las nubes de gas, los cuásares y las galaxias contribuyen al campo gravitatorio (en lenguaje geométrico, a la curvatura del espacio-tiempo) justo en el lugar en el que se encuentra ahora. Las cosas que son más masivas y menos distantes ejercen una mayor influencia gravitatoria, pero el campo gravitatorio que sientes representa la influencia combinada de la materia que está ahí fuera.[20] El camino que tomarías si te rindieras completamente a la gravedad y asumieras el movimiento de caída libre - el punto de referencia en el que te convertirías para juzgar si algún otro objeto se está acelerando - *estaría influenciado* por toda la materia en el cosmos, por las estrellas en los cielos y por la casa de al lado. Así, en relatividad general, cuando se dice que un objeto se está acelerando, significa que el objeto se está acelerando con respecto a un punto de referencia determinado por la materia esparcida por todo el universo. Esa es una conclusión que tiene el sentido de lo que Mach defendía. Así que, en este sentido, la relatividad general incorpora parte del pensamiento de Mach.

Sin embargo, la relatividad general no confirma todo el razonamiento de Mach, como podemos ver directamente al considerar, una vez más, el cubo giratorio en un universo por lo demás vacío. En un universo vacío e invariable, sin estrellas, sin planetas, sin nada en absoluto, no hay gravedad. [21] Y sin gravedad, el espacio-tiempo no está combado - toma la forma simple y no curvada que se muestra en la Figura 3.9b - y eso significa que estamos de vuelta en el escenario más simple de la relatividad especial. (Recuerde, Einstein ignoró la gravedad mientras desarrollaba la relatividad especial. La relatividad general compensó esta deficiencia incorporando la gravedad, pero cuando el universo está vacío e invariable no hay gravedad, por lo que la relatividad general se reduce a la relatividad especial). Si ahora introducimos el cubo en este universo vacío, tiene una masa tan diminuta que su presencia apenas afecta a la forma del espacio en absoluto. Así que la discusión que tuvimos antes sobre el cubo en la relatividad restringida se aplica igualmente a la relatividad general. En contradicción con lo que Mach habría predicho, la relatividad general llega a la misma respuesta que la relatividad restringida, y proclama que incluso en un universo por lo demás vacío, *te*sentirás presionado contra la pared interna del cubo giratorio; en un universo por lo demás vacío, tus brazos *se sentirán* tirados hacia afuera si das vueltas; en un universo por lo demás vacío, la cuerda atada entre dos rocas giratorias *se tensará*.

La conclusión a la que llegamos es que, incluso en relatividad general, el espacio tiempo vacío proporciona un punto de referencia para el movimiento acelerado.

Por lo tanto, aunque la relatividad general incorpora algunos elementos del pensamiento de Mach, no se suscribe a la concepción completamente relativa del movimiento que Mach defendía. [22] El principio de Mach es un ejemplo de una idea provocativa que sirvió de inspiración para un descubrimiento revolucionario, aunque ese descubrimiento finalmente no abrazó plenamente la idea que lo inspiró.

El espacio-tiempo en el tercer milenio

El cubo giratorio ha tenido un largo recorrido. Desde el espacio absoluto y el tiempo absoluto de Newton, pasando por las concepciones relacionales de Leibniz y luego de Mach, hasta la comprensión de Einstein en relatividad especial de que el espacio y el tiempo son relativos y que, sin embargo, en su unión llenan el espacio tiempo absoluto, hasta su posterior descubrimiento en relatividad general de que el espacio tiempo es un jugador dinámico en el cosmos en desarrollo, el cubo siempre ha estado ahí. Girando en la parte posterior de la mente, ha proporcionado una prueba sencilla y silenciosa de si lo invisible, lo abstracto, lo intocable del espacio y el tiempo, más en general, es lo suficientemente sustancial como para proporcionar la referencia última del movimiento. ¿El veredicto? Aunque el tema aún se debate, como hemos visto, la lectura más directa de Einstein y su relatividad general es que el espacio tiempo puede proporcionar tal punto de referencia: *el espacio tiempo es alg*o. [23]

Obsérvese, sin embargo, que esta conclusión también es motivo de celebración entre los partidarios de una perspectiva relativista más amplia. En la opinión de Newton y posteriormente en la de la relatividad especial, el espacio y luego el espacio tiempo fueron invocados como entidades que proporcionan la referencia para definir el movimiento acelerado. Y puesto que, según estas perspectivas, el espacio y el espacio-tiempo son absolutamente inalterables, esta noción de aceleración es absoluta. Sin embargo, en la relatividad general, el carácter del espacio tiempo es completamente diferente. El espacio y el tiempo son dinámicos en relatividad general: son mutables; responden a la presencia de masa y energía; no son absolutos. El espacio tiempo y, en particular, la forma en que se deforma y curva, es una encarnación del campo gravitatorio. Así pues, en la relatividad general, la aceleración relativa al espaciotiempo está muy lejos de la concepción absoluta, incondicionalmente no relacional, invocada por las teorías anteriores. En cambio, como argumentó elocuentemente Einstein unos pocos años antes de morir, la la relatividad general *es relacional*. No es una aceleración relativa a objetos materiales como piedras o estrellas, sino que es una aceleración relativa a algo igual de real, tangible y cambiante: un campo, el campo gravitatorio. [6] En este

sentido, el espaciotiempo, al ser la encarnación de la gravedad, es *tan* real en la relatividad general que el punto de referencia que proporciona es uno que muchos relacionistas pueden aceptar cómodamente.

El debate sobre los temas tratados en este capítulo continuará sin duda mientras buscamos a tientas para entender lo que el espacio, el tiempo y el espacio-tiempo son realmente. Con el desarrollo de la mecánica cuántica, la trama sólo se complica. Los conceptos de espacio vacío y de la nada adquieren un significado totalmente nuevo cuando la incertidumbre cuántica toma el escenario. De hecho, desde 1905, cuando Einstein eliminó el éter lumínico, la idea de que el espacio está lleno de sustancias invisibles ha vuelto con fuerza. Como veremos en capítulos posteriores, los principales avances de la física moderna han restablecido diversas formas de una entidad similar al éter, ninguna de las cuales establece una norma absoluta para el movimiento como el éter luminiscente original, pero todas ellas desafían completamente la ingenua concepción de lo que significa que el espacio tiempo esté vacío. Además, como veremos ahora, *el* papel más básico que desempeña el espacio en un universo clásico -como el medio que separa un objeto de otro, como la materia intermedia que nos permite declarar definitivamente que un objeto es distinto e independiente de otro- está totalmente cuestionado por las sorprendentes conexiones cuánticas.

4 - Enredando el espacio

¿QUÉ SIGNIFICA ESTAR SEPARADO EN UN UNIVERSO CUÁNTICO?

Aceptar la relatividad especial y general es abandonar el espacio absoluto y el tiempo absoluto newtonianos. Aunque no es fácil, puedes entrenar tu mente para hacer esto. Siempre que te muevas, imagina tu ahora alejándote del ahora que experimentan todos los demás que no se mueven contigo. Mientras conduces por una autopista, imagina que tu reloj hace tictac a una velocidad diferente a la de los relojes de las casas que pasas a toda velocidad. Mientras miras desde la cima de una montaña, imagina que debido a la deformación del espacio tiempo, el tiempo pasa más rápido para ti que para los que están sujetos a una mayor gravedad en el suelo muy abajo. Digo "imagina" porque en circunstancias ordinarias como estas, los efectos de la relatividad son tan pequeños que pasan completamente desapercibidos. La experiencia cotidiana no revela por tanto cómo funciona realmente el universo, y es por eso que cien años después de Einstein, casi nadie, ni siquiera los físicos profesionales, siente la relatividad en sus huesos. Esto no es sorprendente; uno está muy presionado para encontrar la ventaja de supervivencia que ofrece un sólido conocimiento de la relatividad. Las concepciones erróneas de Newton sobre el espacio y el tiempo absolutos funcionan maravillosamente bien a las velocidades lentas y la gravedad moderada que encontramos en la vida diaria,

de modo que nuestros sentidos no están bajo ninguna presión evolutiva para desarrollar la perspicacia relativista. Por lo tanto, la conciencia profunda y la verdadera comprensión requieren que utilicemos diligentemente nuestro intelecto para llenar los huecos dejados por nuestros sentidos.

Mientras que la relatividad representaba una ruptura monumental con las ideas tradicionales sobre el universo, entre 1900 y 1930 otra revolución también estaba poniendo la física patas arriba. Comenzó a principios del siglo XX con un par de trabajos sobre las propiedades de la radiación, uno de Max Planck y otro de Einstein; éstos, después de tres décadas de intensa investigación, condujeron a la formulación de la mecánica cuántica. Al igual que con la relatividad, cuyos efectos se vuelven significativos bajo los extremos de la velocidad o la gravedad, la nueva física de la mecánica cuántica se revela abundantemente sólo en otra situación extrema: el reino de lo extremadamente pequeño. Pero hay una aguda distinción entre los trastornos de la relatividad y los de la mecánica cuántica. La rareza de la relatividad surge porque nuestra experiencia personal del espacio y el tiempo difiere de la experiencia de los demás. Es una rareza nacida de la comparación. Nos vemos obligados a admitir que nuestra visión de la realidad no es más que una entre muchas, un número infinito, de hecho, que encajan todas en el conjunto sin fisuras del espacio tiempo.

La mecánica cuántica es diferente. Su rareza es evidente sin comparación. Es más difícil entrenar la mente para tener intuición de mecánica cuántica, porque la mecánica cuántica rompe nuestra propia concepción personal e individual de la realidad.

El mundo según el Quantum

Cada época desarrolla sus historias o metáforas de cómo el universo fue concebido y estructurado. Según un antiguo mito de la creación india, el universo fue creado cuando los dioses desmembraron al gigante primordial Purusa, cuya cabeza se convirtió en el cielo, cuyos pies se convirtieron en la tierra y cuyo aliento se convirtió en el viento. Para Aristóteles, el universo era una colección de cincuenta y cinco esferas cristalinas concéntricas, siendo la más exterior el cielo, que rodeaba a las de los planetas, la tierra y sus elementos, y finalmente los siete círculos del infierno.[1] Con Newton y su precisa y determinista formulación matemática del movimiento, la descripción cambió de nuevo. El universo fue comparado con un enorme y gran reloj: después de ser enrollado y puesto en su estado inicial, el universo de relojería hace tictac de un momento a otro con completa regularidad y previsibilidad.

La relatividad especial y general señaló importantes sutilezas de la metáfora del reloj: no hay un reloj único, preferido, universal; no hay consenso sobre lo que constituye un momento, lo que constituye un *ahora.* Aún así, todavía se puede

contar una historia de relojería sobre el universo en evolución. El reloj es tu reloj. La historia es tu historia. Pero el universo se desarrolla con la misma regularidad y previsibilidad que en el marco newtoniano. Si de alguna manera conoces el estado del universo en este momento -si sabes dónde está *cada* partícula y a qué velocidad y en qué dirección se mueve *cada una de ellas*- entonces, Newton y Einstein están de acuerdo, puedes, en principio, usar las leyes de la física para predecir todo sobre el universo de forma arbitraria en el futuro o para averiguar cómo era en el pasado. [2]

La mecánica cuántica rompe con esta tradición.*No podemos saber* la ubicación exacta y la velocidad exacta de una sola partícula.*No podemos predecir* con total certeza el resultado de ni siquiera el más simple de los experimentos, y mucho menos la evolución de todo el cosmos. La mecánica cuántica muestra que lo mejor que podemos hacer es predecir la *probabilidad de* que un experimento resulte de esta manera o de aquella. Y como la mecánica cuántica ha sido verificada a través de décadas de experimentos fantásticamente precisos, el reloj cósmico newtoniano, incluso con su actualización einsteniana, es una metáfora insostenible; es demostrable que *no es así* como funciona el mundo.

Pero la ruptura con el pasado es aún más completa. Aunque las teorías de Newton y Einstein difieren marcadamente en la naturaleza del espacio y el tiempo, están de acuerdo en ciertos hechos básicos, ciertas verdades que parecen ser evidentes. Si hay espacio entre dos objetos, si hay dos pájaros en el cielo y uno está a la derecha y el otro a la izquierda, podemos considerar y consideramos que los dos objetos son independientes. Los consideramos como entidades separadas y distintas. El espacio, sea lo que sea fundamentalmente, proporciona el medio que separa y distingue un objeto del otro. Eso es lo que hace el espacio. Las cosas que ocupan diferentes lugares en el espacio son cosas diferentes. Además, para que un objeto influya en otro, debe de alguna manera negociar el espacio que los separa. Un pájaro puede volar hacia el otro, atravesando el espacio entre ellos, y luego picotear o empujar a su compañero. Una persona puede influenciar a otra disparando una honda, haciendo que un guijarro atraviese el espacio entre ellos, o gritando, causando un efecto dominó de moléculas de aire que rebotan, una empujando a la otra hasta que alguna se golpea en el tímpano del receptor. Siendo aún más sofisticados, uno puede ejercer influencia sobre otro disparando un láser, causando una onda electromagnética -un rayo de luz- que atraviesa el espacio intermedio; o, siendo más ambiciosos (como los bromistas extraterrestres del último capítulo) uno puede sacudir o mover un cuerpo masivo (como la luna) enviando una perturbación gravitacional que va a toda velocidad de un lugar a otro. Por supuesto, si estamos aquí podemos influenciar a alguien allá, pero no importa cómo lo hagamos, el procedimiento siempre involucra a alguien o algo que viaja de aquí a allá, y sólo cuando el alguien o algo llega allí puede ejercerse la influencia.

Los físicos llaman a esta característica de la localidad del universo, enfatizando el punto de que sólo puedes afectar directamente a las cosas que están a tu lado, que son locales. El vudú contraviene la localidad, ya que implica hacer algo por aquí y afectar algo por allá sin necesidad de que nada viaje de aquí a allá, pero la experiencia común nos lleva a pensar que experimentos verificables y repetibles confirmarían la localidad. [3] Y la mayoría lo hace.

Pero una clase de experimentos realizados durante el último par de décadas ha demostrado que algo que hacemos aquí (como la medición de ciertas propiedades de una partícula) *puede* ser sutilmente entrelazado con algo que ocurre allá (como el resultado de la medición de ciertas propiedades de otra partícula distante), *sin que* nada sea enviado de aquí a allá. Aunque intuitivamente desconcertante, este fenómeno se ajusta plenamente a las leyes de la mecánica cuántica, y se predijo usando la mecánica cuántica mucho antes de que existiera la tecnología para hacer el experimento y observar, notablemente, que la predicción es correcta. Esto suena a vudú; Einstein, que fue uno de los primeros físicos en reconocer -y criticar duramente- esta posible característica de la mecánica cuántica, la llamó "espeluznante". Pero como veremos, los enlaces a larga distancia que estos experimentos confirman son extremadamente delicados y están, en un sentido preciso, fundamentalmente más allá de nuestra capacidad de control.

No obstante, estos resultados, procedentes de consideraciones tanto teóricas como experimentales, apoyan firmemente la conclusión de que el universo admite interconexiones que no son locales. [4] Algo que ocurre aquí puede entrelazarse con algo que ocurre allá, incluso si nada viaja de aquí a allá, e incluso si no hay suficiente tiempo para que nada, ni siquiera la luz, viaje entre los eventos. Esto significa que el espacio no puede ser pensado como lo fue una vez: el espacio intermedio, *sin importar cuánto haya, no asegura* que dos objetos estén separados, ya que la mecánica cuántica permite que exista un entrelazamiento, una especie de conexión, entre ellos. Una partícula, como una de las innumerables que nos componen a ti o a mí, puede correr pero no puede esconderse. Según la teoría cuántica y los muchos experimentos que confirman sus predicciones, la conexión cuántica entre dos partículas puede persistir incluso si están en lados opuestos del universo. Desde el punto de vista de su entrelazamiento, a pesar de los muchos billones de kilómetros de espacio entre ellas, es como si estuvieran justo encima de la otra.

Numerosos asaltos a nuestra concepción de la realidad están emergiendo de la física moderna; encontraremos muchos en los siguientes capítulos. Pero de los que han sido verificados experimentalmente, no encuentro ninguno más alucinante que el reciente descubrimiento de que nuestro universo no es local.

El rojo y el azul

Para tener una idea del tipo de no-localidad que surge de la mecánica cuántica, imagínese que la Agente Scully, largamente esperada por unas vacaciones, se retira a la finca de su familia en Provenza. Antes de que tenga tiempo de deshacer las maletas, suena el teléfono. Es el Agente Mulder llamando desde América.

"¿Conseguiste la caja, la que está envuelta en papel rojo y azul?"

Scully, que ha dejado todo su correo en un montón junto a la puerta, mira y ve el paquete. "Mulder, por favor, no he venido hasta Aix sólo para ocuparme de otro montón de archivos".

"No, no, el paquete no es mío. Yo también tengo uno, y dentro hay estas pequeñas cajas de titanio a prueba de luz, numeradas del 1 al 1.000, y una carta diciendo que recibirías un paquete idéntico."

"Sí, ¿y qué?" Scully responde lentamente, empezando a temer que las cajas de titanio puedan de alguna manera terminar acortando sus vacaciones.

"Bueno", continúa Mulder, "la carta dice que cada caja de titanio contiene una esfera alienígena que parpadeará en rojo o azul en el momento en que la pequeña puerta de su lado se abra".

"Mulder, ¿se supone que debo estar impresionada?"

"Bueno, todavía no, pero escucha. La carta dice que *antes de abrir una* caja determinada, la esfera tiene la capacidad de parpadear en rojo o en azul, y decide al azar entre los dos colores en el momento en que se abre la puerta. Pero aquí está la parte extraña. La carta dice que aunque sus cajas funcionan exactamente de la misma manera que las mías, aunque las esferas dentro de cada una de nuestras cajas eligen *al azar entre el rojo* o el azul que parpadea, nuestras cajas de alguna manera funcionan en tándem. La carta afirma que hay una conexión misteriosa, de modo que si hay un destello azul cuando abro mi caja 1, también encontrarás un destello azul cuando abras tu caja 1; si veo un destello rojo cuando abra la caja 2, también verás un destello rojo en tu caja 2, y así sucesivamente".

"Mulder, estoy realmente agotada; dejemos que los trucos de salón esperen hasta que regrese".

"Scully, por favor. Sé que estás de vacaciones, pero no podemos dejar pasar esto. Sólo necesitamos unos minutos para ver si es verdad".

A regañadientes, Scully se da cuenta de que la resistencia es inútil, así que va y abre sus pequeñas cajas. Y al comparar los colores que destellan dentro de cada caja, Scully y Mulder encuentran el acuerdo previsto en la carta. A veces la esfera de una caja parpadea en rojo, a veces en azul, pero al abrir las cajas con el mismo número, Scully y Mulder siempre ven el mismo color de flash. Mulder se excita y

agita cada vez más por las esferas alienígenas, pero Scully no se impresiona en absoluto.

"Mulder", dice Scully severamente en el teléfono, "realmente necesitas unas vacaciones". Esto es una tontería. Obviamente, la esfera dentro de cada una de nuestras cajas ha sido programada para parpadear en rojo o ha sido programada para parpadear en azul cuando la puerta de su caja se abre. Y quienquiera que nos haya enviado esta tontería programó nuestras cajas idénticamente para que tú y yo encontremos el mismo color de flash en las cajas con el mismo número".

"Pero no, Scully, la carta dice que cada esfera alienígena elige *al azar* entre el azul y el rojo parpadeante cuando se abre la puerta, *no* que la esfera haya sido preprogramada para elegir un color u otro".

"Mulder", suspira Scully, "mi explicación tiene mucho sentido y encaja con todos los datos. ¿Qué más quieres? Y mira aquí, al final de la carta. Aquí está la mayor risa de todas. La letra pequeña "alienígena" nos informa que no sólo abrir la puerta de una caja causará que la esfera que hay dentro parpadee, sino que cualquier otra manipulación de la caja para averiguar cómo funciona, por ejemplo, si intentamos examinar la composición de colores de la esfera o la composición química antes de abrir la puerta, también causará que parpadee. En otras palabras, no podemos analizar la supuesta selección aleatoria de rojo o azul porque cualquier intento de este tipo contaminará el mismo experimento que estamos tratando de llevar a cabo. Es como si te dijera que soy realmente rubia, pero me vuelvo pelirroja cada vez que tú o cualquier persona o cosa me mira el pelo o lo analiza de alguna manera. ¿Cómo podrías probar que estoy equivocada? Tus hombrecitos verdes son muy listos, han preparado las cosas para que no se pueda desenmascarar su artimaña. Ahora, ve a jugar con tus cajitas mientras yo disfruto de un poco de paz y tranquilidad".

Parecería que Scully tiene esto bien envuelto en el lado de la ciencia. Sin embargo, el asunto es el siguiente. Los mecánicos cuánticos -científicos, no alienígenas- han estado haciendo durante casi ochenta años afirmaciones sobre cómo funciona el universo que son muy parecidas a las descritas en la carta. Y el problema es que ahora hay una fuerte evidencia científica de que un punto de vista como el de Mulder, no el de Scully, está apoyado por los datos. Por ejemplo, de acuerdo con la mecánica cuántica, una partícula puede colgar en un estado de limbo entre tener una u otra propiedad particular -como una esfera "alienígena" que flota entre el rojo y el azul intermitente antes de que se abra la puerta de su caja- y sólo cuando la partícula se mira (se mide) se compromete aleatoriamente a una propiedad definida u otra. Por si esto no fuera suficientemente extraño, la mecánica cuántica también predice que puede haber conexiones entre las partículas, similares a las que se afirma que existen entre las esferas extraterrestres. Dos partículas pueden estar tan entrelazadas por efectos cuánticos que su selección aleatoria de una u otra propiedad está correlacionada:

así como cada una de las esferas alienígenas elige aleatoriamente entre el rojo y el azul y, sin embargo, de alguna manera, los colores elegidos por las esferas en las cajas con el mismo número están correlacionados (tanto el rojo intermitente como el azul intermitente), las propiedades elegidas aleatoriamente por dos partículas, incluso si están muy separadas en el espacio, pueden igualmente estar perfectamente alineadas. A grandes rasgos, aunque las dos partículas están muy separadas, la mecánica cuántica muestra que lo que hace una partícula, también lo hará la otra.

Como ejemplo concreto, si llevas un par de gafas de sol, la mecánica cuántica muestra que hay un 50-50 de posibilidades de que un fotón particular -como el que se refleja hacia ti desde la superficie de un lago o desde una carretera asfaltada- pase a través de tus lentes polarizadas antideslumbrantes: cuando el fotón golpea el cristal, "elige" aleatoriamente entre reflejarse y pasar a través de él. Lo sorprendente es que un fotón de este tipo puede tener un fotón compañero que se ha alejado a kilómetros de distancia en la dirección opuesta y, sin embargo, cuando se enfrenta a la misma probabilidad 50-50 de pasar a través de otra lente polarizada de gafas de sol, hará de alguna manera lo que hace el fotón inicial.Aunque *cada resultado se determina al azar y aunque los fotones están muy separados en el espacio, si un fotón lo atraviesa, también lo hará el otro.* Este es el tipo de no-localidad predicha por la mecánica cuántica.

Einstein, que nunca fue un gran fan de la mecánica cuántica, era reacio a aceptar que el universo funcionara de acuerdo a tan extrañas reglas. Defendió explicaciones más convencionales que eliminaron la noción de que las partículas seleccionan atributos y resultados al azar cuando se miden. En su lugar, Einstein argumentó que si se observa que dos partículas ampliamente separadas comparten ciertos atributos, esto no es evidencia de alguna misteriosa conexión cuántica que correlacione instantáneamente sus propiedades. Más bien, al igual que Scully argumentó que las esferas no eligen al azar entre el rojo y el azul, sino que están programadas para destellar un color particular cuando se las observa, Einstein afirmó que las partículas no eligen al azar entre tener una característica u otra sino que, en cambio, están igualmente "programadas" para tener una característica particular y definida cuando se las mide adecuadamente. La correlación entre el comportamiento de los fotones ampliamente separados es una prueba, afirmaba Einstein, de que los fotones están dotados de propiedades idénticas cuando se emiten, no que estén sujetos a algún extraño entrelazamiento cuántico a larga distancia.

Durante casi cinco décadas, la cuestión de quién tenía razón -Einstein o los partidarios de la mecánica cuántica- quedó sin resolver porque, como veremos, el debate se volvió muy parecido al que se produjo entre Scully y Mulder: cualquier intento de refutar las extrañas conexiones de la mecánica cuántica propuestas y dejar intacta la visión más convencional de Einstein se topó con la afirmación de que los experimentos en sí mismos contaminarían necesariamente las mismas

características que estaban tratando de estudiar. Todo esto cambió en la década de 1960. Con una perspicacia asombrosa, el físico irlandés John Bell demostró que el tema podía ser resuelto experimentalmente, y para los años 80 lo fue. La lectura más directa de los datos es que Einstein estaba equivocado y que puede haber conexiones cuánticas extrañas, raras y "espeluznantes" entre las cosas de aquí y las de allá.[5]

El razonamiento detrás de esta conclusión es tan sutil que los físicos tardaron más de tres décadas en apreciarlo plenamente. Pero después de cubrir las características esenciales de la mecánica cuántica veremos que el núcleo del argumento se reduce a nada más complejo que un rompecabezas de Click and Clack.

Echando una ola

Si hace brillar un puntero láser sobre un pequeño trozo de película negra de 35 mm sobreexpuesta de la cual ha rascado la emulsión en dos líneas extremadamente cercanas y estrechas, verá la evidencia directa de que la luz es una onda. Si nunca has hecho esto, vale la pena intentarlo (puedes usar muchas cosas en lugar de la película, como la malla de alambre en un elegante desatascador de café). La imagen que verá cuando la luz láser pase por las rendijas de la película y golpee una pantalla consiste en bandas claras y oscuras, como en la figura 4.1, y la explicación de este patrón se basa en una característica básica de las ondas. Las ondas de agua son las más fáciles de visualizar, así que primero expliquemos el punto esencial con las ondas en un gran y plácido lago, y luego apliquemos nuestra comprensión a la luz.

Una ola de agua perturba la superficie plana de un lago creando regiones en las que el nivel del agua es más alto de lo habitual y regiones en las que es más bajo de lo habitual. La parte más alta de una ola se llama s*pico* y la más baja su depresión*.* Una ola típica implica una sucesión periódica: pico seguido de depresión seguido de pico, y así sucesivamente. Si dos ondas se dirigen hacia la otra -si, por ejemplo, usted y yo dejamos caer una piedra en el lago en lugares cercanos, produciendo ondas que se mueven hacia afuera y que se chocan entre sí- cuando se cruzan allí se produce un importante efecto conocido como interferencia*,* ilustrado en la figura 4.2a. Cuando se cruzan un pico de una onda y un pico de la otra, la altura del agua es aún mayor, siendo la suma de las dos alturas de los picos. Del mismo modo, cuando se cruzan un pico de una ola y un pico de la otra, la depresión del agua es aún más profunda, siendo la suma de las dos depresiones. Y aquí está la combinación más importante: cuando el pico de una ola cruza el canal de otra, tienden a anularse mutuamente, ya que el pico trata de hacer que el agua suba mientras que el canal trata de arrastrarla hacia abajo. Si la altura del pico de una ola es igual a la profundidad de la depresión de la otra,

habrá una cancelación perfecta cuando se crucen, por lo que el agua en ese lugar no se moverá en absoluto.

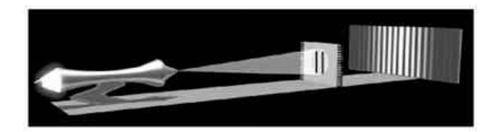


Figura 4.1 La luz láser que pasa por dos rendijas grabadas en un trozo de película negra produce un patrón de interferencia en una pantalla de detector, mostrando que la luz es una onda.

El mismo principio explica el patrón que forma la luz cuando pasa por las dos rendijas de la figura 4.1. La luz es una onda electromagnética; cuando pasa por las dos rendijas, se divide en dos ondas que se dirigen hacia la pantalla. Al igual que las dos ondas de agua que acabamos de comentar, las dos ondas de luz interfieren entre sí. Cuando golpean varios puntos de la pantalla, a veces ambas ondas están en su punto máximo, haciendo que la pantalla sea brillante; a veces ambas ondas están en su punto mínimo, haciéndola también brillante; pero a veces una onda está en su punto máximo y la otra en su punto mínimo y se cancelan, haciendo que ese punto de la pantalla se oscurezca. Ilustramos esto en la Figura 4.2b.

Cuando el movimiento ondulatorio se analiza en detalle matemático, incluyendo los casos de cancelaciones parciales entre las ondas en varias etapas entre los picos y las bajadas, se puede mostrar que las manchas brillantes y oscuras llenan las bandas que se ven en la Figura 4.1. Por lo tanto, las bandas brillantes y oscuras son un signo revelador de que la luz es una onda, un tema que ha sido muy debatido desde que Newton afirmó que la luz no es una onda sino que está compuesta por una corriente de partículas (más sobre esto en un momento). Además, este análisis se aplica igualmente bien a *cualquier* tipo de onda (onda de luz, onda de agua, onda de sonido, etc.) y, por lo tanto, los patrones de interferencia proporcionan la metafórica pistola humeante: se sabe que se trata de una onda si, cuando se la obliga a pasar a través de dos rendijas del tamaño adecuado (determinadas por la distancia entre los picos y los bajos de la onda), el patrón de intensidad resultante se parece al de la figura 4.1 (con las regiones brillantes representando la alta intensidad y las regiones oscuras siendo la baja intensidad).

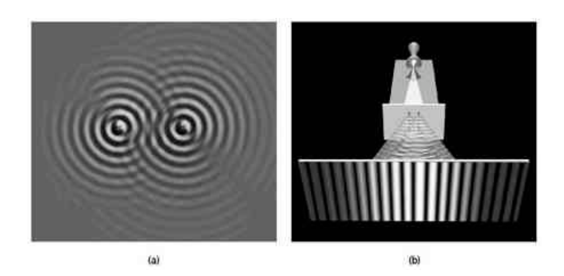
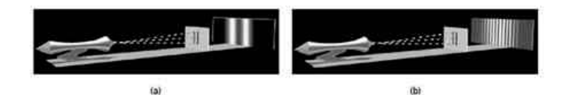


Figura 4.2 Las ondas de agua superpuestas producen un patrón de interferencia. luz superpuestas producen un patrón de interferencia.

En 1927, Clinton Davisson y Lester Germer dispararon un rayo de electrones - entidades de partículas sin conexión aparente con las ondas- a un trozo de cristal de níquel; los detalles no tienen por qué preocuparnos, pero lo que sí importa es que este experimento equivale a disparar un rayo de electrones a una barrera con dos rendijas. Cuando los experimentadores permitieron que los electrones que pasaron por las rendijas viajaran hacia una pantalla de fósforo donde la ubicación de su impacto fue registrada por un pequeño destello (el mismo tipo de destellos responsables de la imagen en su pantalla de televisión), los resultados fueron sorprendentes. Pensando en los electrones como pequeñas bolitas o balas, naturalmente esperarías que sus posiciones de impacto se alinearan con las dos rendijas, como en la figura 4.3a. Pero eso no es lo que Davisson y Germer encontraron. Su experimento produjo datos ilustrados esquemáticamente en la figura 4.3b: las posiciones de impacto de los electrones rellenaron un patrón de interferencia característico de las ondas. Davisson y Germer habían encontrado el arma humeante.Habían *demostrado que el haz de electrones de partículas debe, inesperadamente, ser algún tipo de onda.*



La física clásica predice que los electrones disparados a una barrera con dos rendijas producirán dos rayas brillantes en un detector. **La física cuántica predice**, y los experimentos confirman, que los electrones producirán un patrón de interferencia, mostrando que incorporan características ondulatorias.

Ahora, puede que no pienses que esto es particularmente sorprendente. El agua está hecha de moléculas H_2O, y una onda de agua surge cuando muchas moléculas se mueven en un patrón coordinado. Un grupo de moléculas H_2O sube en un lugar, mientras que otro grupo baja en un lugar cercano. Tal vez los datos ilustrados en la figura 4.3 muestran que los electrones, como las moléculas H_2O, a veces se mueven en concierto, creando un patrón ondulatorio en su movimiento

general y macroscópico. Aunque a primera vista esto podría parecer una sugerencia razonable, la historia real es mucho más inesperada.

Inicialmente imaginamos que una inundación de electrones fue disparada continuamente desde el cañón de electrones en la figura 4.3. Pero podemos afinar el cañón para que dispare cada vez menos electrones cada segundo; de hecho, podemos afinarlo hasta el final para que dispare, digamos, sólo un electrón cada diez segundos. Con suficiente paciencia, podemos hacer este experimento durante un largo período de tiempo y registrar la posición de impacto de cada electrón individual que pasa por las rendijas. Las figuras 4.4a-4.4c muestran los datos acumulados resultantes después de una hora, medio día y un día completo. En la década de 1920, imágenes como estas sacudieron los cimientos de la física.Vemos *que incluso los electrones individuales, de partículas, que se mueven a la pantalla de forma independiente, por separado, uno por uno, construye*n *el patrón de interferencia característico de las ondas.*

Esto es como si una molécula individual de*no* están haciendo la ola. Más que eso, la interferencia de la onda parece requerir una onda de *aquí* para cruzar una onda de *allá.* Entonces, ¿cómo puede la interferencia ser relevante para los ingredientes individuales de las partículas? Pero de alguna manera, como atestiguan los datos de interferencia de la figura 4.4, aunque los electrones individuales son diminutas partículas de materia, todos y cada uno de ellos también encarnan un carácter ondulatorio.

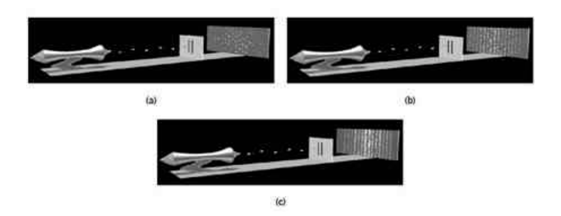


Figura 4.4 Los electrones disparados uno a uno hacia las rendijas construyen un patrón de interferencia punto a punto. En **(** a **)-(** c **) ilustramos** el patrón que se forma con el tiempo.

La probabilidad y las leyes de la física

Si un electrón individual es también una onda, ¿qué es lo que está ondeando? Erwin Schrödinger lo sopesó con la primera conjetura: tal vez el material del que están hechos los electrones puede ser esparcido en el espacio y es esta esencia de electrones esparcidos la que hace la onda. Una partícula de electrón, desde este punto de vista, sería una punta afilada en una niebla de electrones. Sin embargo, rápidamente se comprendió que esta sugerencia no podía ser correcta

porque incluso una forma de onda con puntas agudas, como una onda de marea gigante, finalmente se extiende. Y si la onda de electrones con púas se extendiera, esperaríamos encontrar parte de la carga eléctrica de un solo electrón por aquí o parte de su masa por allá. Pero nunca lo hacemos. Cuando localizamos un electrón, siempre encontramos toda su masa y toda su carga concentrada en una pequeña región puntual. En 1927, Max Born presentó una sugerencia diferente, que resultó ser el paso decisivo que forzó a la física a entrar en un reino radicalmente nuevo. La onda, afirmó, no es un electrón difuminado, ni es nada que se haya encontrado antes en la ciencia. La onda, propuso Born, es una onda de *proba* bility.

Para comprender lo que esto significa, imagínese una instantánea de una ola de agua que muestre regiones de alta intensidad (cerca de los picos y las depresiones) y regiones de baja intensidad (cerca de las regiones de transición más plana entre los picos y las depresiones). Cuanto mayor es la intensidad, mayor es el potencial que tiene la ola de agua para ejercer fuerza en los barcos cercanos o en las estructuras de la línea costera. Las ondas de probabilidad previstas por Born también tienen regiones de alta y baja intensidad, pero el significado que atribuyó a estas formas de onda fue inesperado: *el tamaño de una onda en un punto determinado del espacio es proporcional a la probabilidad de que el electrón se encuentre en ese punto del espacio.* Los lugares donde la onda de probabilidad es grande son los lugares donde es más probable que se encuentre el electrón. Los lugares donde la onda de probabilidad es pequeña son los lugares donde es poco probable que se encuentre el electrón. Y los lugares en los que la onda de probabilidad es cero son lugares en los que no se encontrará el electrón.

La figura 4.5 da una "instantánea" de una onda de probabilidad con las etiquetas enfatizando la interpretación probabilística de Born. Sin embargo, a diferencia de una fotografía de ondas de agua, esta imagen no podría haber sido hecha con una cámara. Nadie ha visto nunca directamente una onda de probabilidad, y el razonamiento de la mecánica cuántica convencional dice que nadie lo hará nunca. En su lugar, usamos ecuaciones matemáticas (desarrolladas por Schrödinger, Niels Bohr, Werner Heisenberg, Paul Dirac, y otros) para averiguar cómo debería ser la onda de probabilidad en una situación dada. Luego probamos tales cálculos teóricos comparándolos con los resultados experimentales de la siguiente manera. Después de calcular la supuesta onda de probabilidad para el electrón en una situación experimental dada, realizamos versiones idénticas del experimento una y otra vez desde cero, registrando cada vez la posición medida del electrón.*En contraste con lo que Newton hubiera esperado, los experimentos idénticos y las condiciones de partida no conducen necesariamente a mediciones idénticas.* En su lugar, nuestras mediciones dan como resultado una variedad de lugares medidos. A veces encontramos el electrón aquí, a veces allí, y de vez en cuando lo encontramos *por* allá. Si la mecánica cuántica es correcta, el número de veces que encontramos el electrón en un punto dado debería ser proporcional al tamaño

(en realidad, el cuadrado del tamaño), en ese punto, de la onda de probabilidad que calculamos. Ocho décadas de experimentos han demostrado que las predicciones de la mecánica cuántica se confirman con una precisión espectacular.

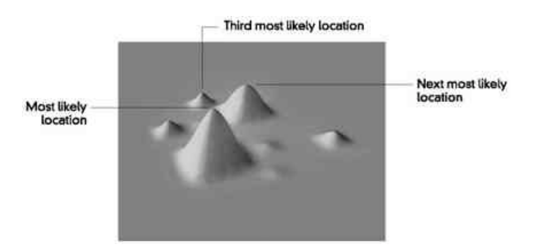


Figura 4.5 La onda de probabilidad de una partícula, como un electrón, nos dice la probabilidad de encontrar la partícula en un lugar u otro.

Sólo una parte de la onda de probabilidad de un electrón se muestra en la figura 4.5: según la mecánica cuántica, cada onda de probabilidad se extiende por todo el espacio, por todo el universo. [6] En muchas circunstancias, sin embargo, la onda de probabilidad de una partícula cae rápidamente muy cerca de cero fuera de alguna pequeña región, indicando la abrumadora probabilidad de que la partícula esté en esa región. En tales casos, la parte de la onda de probabilidad que queda fuera de la figura 4.5 (la parte que se extiende por todo el resto del universo) se parece mucho a la parte cercana a los bordes de la figura: bastante plana y cercana al valor cero. Sin embargo, mientras la onda de probabilidad en algún lugar de la galaxia de Andrómeda tenga un valor distinto de cero, por pequeño que sea, existe una pequeña pero genuina posibilidad de que el electrón se encuentre allí.

Así, el éxito de la mecánica cuántica nos obliga a aceptar que el electrón, un constituyente de la materia que normalmente imaginamos que ocupa una región diminuta y puntual del espacio, también tiene una descripción que involucra una onda que, por el contrario, se extiende por todo el universo. Además, según la mecánica cuántica esta fusión partícula-onda es válida para todos los constituyentes de la naturaleza, no sólo para los electrones: los protones son tanto particualres como ondulatorios; los neutrones son tanto particualres como ondulatorios, y los experimentos de principios del siglo XX establecieron incluso que la luz -que se puede demostrar que se comporta como una onda, como en la figura 4.1- también se puede describir en términos de ingredientes particulados, los pequeños "haces de luz" llamados fotones mencionados anteriormente.[7] Las conocidas ondas electromagnéticas emitidas por una bombilla de cien vatios, por ejemplo, pueden describirse igualmente bien en términos de que la bombilla emite unos cien mil millones de billones de fotones cada segundo. En el mundo cuántico, hemos aprendido que todo tiene atributos tanto particualres como ondulatorios.

Durante las últimas ocho décadas, la ubicuidad y utilidad de las ondas de probabilidad de la mecánica cuántica para predecir y explicar los resultados experimentales se ha establecido más allá de toda duda. Sin embargo, todavía no hay una forma universalmente aceptada de imaginar lo que son realmente las ondas de probabilidad de la mecánica cuántica. Todavía se debate si debemos decir que la onda de probabilidad de un electrón *es* el electrón, o que está *asociada* con el electrón, o que es un *dispositivo matemático* para describir el movimiento del electrón, o que es la encarnación *de lo que podemos saber* sobre el electrón. Lo que está claro, sin embargo, es que a través de estas ondas, la mecánica cuántica inyecta probabilidad en las leyes de la física de una manera que nadie había previsto. Los meteorólogos usan la probabilidad para predecir la probabilidad de la lluvia. Los casinos usan la probabilidad para predecir la probabilidad de que lances ojos de serpiente. Pero la probabilidad juega un papel en estos ejemplos porque no tenemos toda la información necesaria para hacer predicciones definitivas. Según Newton, si conociéramos con todo detalle el estado del medio ambiente (las posiciones y velocidades de cada uno de sus ingredientes de partículas), seríamos capaces de predecir (con suficiente destreza de cálculo) con certeza si lloverá mañana a las 4:07 p.m.; si conociéramos todos los detalles físicos de relevancia para un juego de dados (la forma y composición precisa de los dados, su velocidad y orientación al salir de la mano, la composición de la mesa y su superficie, y así sucesivamente), seríamos capaces de predecir con certeza cómo aterrizarán los dados. Dado que, en la práctica, no podemos reunir toda esta información (y, aunque pudiéramos, todavía no contamos con ordenadores suficientemente potentes para realizar los cálculos necesarios para hacer tales predicciones), ponemos nuestras miras más bajas y predecimos sólo la probabilidad de un resultado dado en el tiempo o en el casino, haciendo conjeturas razonables sobre los datos que no tenemos.

La probabilidad introducida por la mecánica cuántica es de un carácter diferente, más fundamental. Independientemente de las mejoras en la recogida de datos o en la potencia de los ordenadores, lo mejor que podemos hacer, según la mecánica cuántica, es predecir la probabilidad de tal o cual resultado. Lo mejor que podemos hacer es predecir la probabilidad de que un electrón, o un protón, o un neutrón, o cualquier otro de los constituyentes de la naturaleza, se encuentre aquí o allá. La probabilidad reina suprema en el microcosmos.

Como ejemplo, la explicación que la mecánica cuántica da para los electrones individuales, uno por uno, a lo largo del tiempo, construyendo el patrón de bandas claras y oscuras de la figura 4.4, está ahora clara. Cada electrón individual se describe por su onda de probabilidad. Cuando se dispara un electrón, su onda de probabilidad fluye a través de ambas rendijas. Y al igual que con las ondas de luz y las ondas de agua, las ondas de probabilidad que emanan de las dos rendijas interfieren entre sí. En algunos puntos de la pantalla del detector las dos ondas de probabilidad se refuerzan y la intensidad resultante es grande. En otros puntos las ondas se cancelan parcialmente y la intensidad es pequeña. En otros puntos, los

picos y los bajos de las ondas de probabilidad se cancelan completamente y la intensidad de la onda resultante es exactamente cero. Es decir, hay puntos en la pantalla donde es muy probable que un electrón aterrice, puntos donde es mucho menos probable que lo haga, y lugares donde no hay ninguna posibilidad de que un electrón aterrice. Con el tiempo, las posiciones de aterrizaje de los electrones se distribuyen de acuerdo con este perfil de probabilidad, y por lo tanto obtenemos algunas regiones brillantes, algunas más oscuras y algunas completamente oscuras en la pantalla. El análisis detallado muestra que estas regiones claras y oscuras se verán exactamente como lo hacen en la figura 4.4.

Einstein y la mecánica cuántica

Debido a su naturaleza intrínsecamente probabilística, la mecánica cuántica difiere enormemente de cualquier descripción fundamental previa del universo, ya sea cualitativa o cuantitativa. Desde su inicio en el siglo pasado, los físicos han luchado por enlazar este extraño e inesperado marco con la visión común del mundo; la lucha está aún muy avanzada. El problema radica en reconciliar la experiencia macroscópica de la vida cotidiana con la realidad microscópica revelada por la mecánica cuántica. Estamos acostumbrados a vivir en un mundo que, si bien es cierto que está sujeto a los caprichos de la casualidad económica o política, parece estable y fiable al menos en lo que respecta a sus propiedades físicas. No os preocupa que los componentes atómicos del aire que estáis respirando ahora se disuelvan repentinamente, dejándoos sin aliento al manifestar su carácter de ondas cuánticas al rematerializarse, a voluntad, en el lado oscuro de la luna. Y tienes razón en no preocuparte por este resultado, porque según la mecánica cuántica la probabilidad de que ocurra, aunque no es cero, es absurdamente pequeña. ¿Pero qué hace que la probabilidad sea tan pequeña?

Hay dos razones principales. Primero, en una escala establecida por los átomos, la luna está enormemente lejos. Y, como se ha mencionado, en muchas circunstancias (aunque no en todas), las ecuaciones cuánticas muestran que una onda de probabilidad tiene típicamente un valor apreciable en alguna pequeña región del espacio y cae rápidamente casi a cero a medida que se aleja de esta región (como en la figura 4.5). Así que la probabilidad de que incluso un solo electrón que esperas que esté en la misma habitación que tú -como uno de los que acabas de exhalar- se encuentre en un momento o dos en el lado oscuro de la luna, aunque no sea cero, es extremadamente pequeña. Tan pequeño, que hace que la probabilidad de que te cases con Nicole Kidman o Antonio Banderas parezca enorme en comparación. En segundo lugar, hay *muchos electrones, así como* protones y neutrones, que componen el aire de su habitación. La probabilidad de que *todas* estas partículas hagan lo que es extremadamente improbable incluso para uno es tan pequeña que apenas vale la pena pensarlo un momento. Sería como no sólo casarse con su rompecorazones de estrella de cine,

sino también ganar la lotería de cada estado cada semana durante, bueno, un tiempo que haría que la edad actual del universo pareciera un mero parpadeo cósmico.

Esto da una idea de por qué no encontramos directamente los aspectos probabilísticos de la mecánica cuántica en la vida diaria. Sin embargo, como los experimentos confirman que la mecánica cuántica describe la física fundamental, presenta un ataque frontal a nuestras creencias básicas sobre lo que constituye la realidad. Einstein, en particular, estaba profundamente preocupado por el carácter probabilístico de la teoría cuántica. La física, enfatizaría una y otra vez, está en el negocio de determinar con certeza lo que ha sucedido, lo que está sucediendo y lo que sucederá en el mundo que nos rodea. Los físicos no son corredores de apuestas, y la física no es el negocio de calcular probabilidades. Pero Einstein no podía negar que la mecánica cuántica fue enormemente exitosa en explicar y predecir, aunque en un marco estadístico, las observaciones experimentales del micromundo. Y así, en lugar de intentar demostrar que la mecánica cuántica estaba equivocada, una tarea que todavía parece una tontería a la luz de sus éxitos sin precedentes, Einstein dedicó muchos esfuerzos a tratar de demostrar que la mecánica cuántica no era la última palabra sobre cómo funciona el universo. Aunque no podía decir lo que era, Einstein quiso convencer a todos de que aún no se había encontrado una descripción más profunda y menos extraña del universo.

A lo largo de muchos años, Einstein montó una serie de desafíos cada vez más sofisticados con el fin de revelar las lagunas en la estructura de la mecánica cuántica. Uno de estos desafíos, planteado en 1927 en la Quinta Conferencia Física del Instituto Solvay, [8] se refiere al hecho de que aunque la onda de probabilidad de un electrón pueda parecerse a la de la figura 4.5, siempre que medimos el paradero del electrón lo encontramos en una posición definida u otra. Así pues, se preguntaba Einstein, ¿no significa eso que la onda de probabilidad es simplemente un sustituto temporal para una descripción más precisa, aún por descubrir, que prediga la posición del electrón con certeza? Después de todo, si el electrón se encuentra en X, ¿no significa eso que, en realidad, estaba en X o muy cerca de X un momento antes de que se realizara la medición? Y si es así, Einstein insistió, ¿no refleja la mecánica cuántica la dependencia de la onda de probabilidad -una onda que, en este ejemplo, dice que el electrón tenía cierta probabilidad de haber estado lejos de X- la inadecuación de la teoría para describir la verdadera realidad subyacente?

El punto de vista de Einstein es simple y convincente. ¿Qué podría ser más natural que esperar que una partícula se ubique en, o, al menos, cerca de donde se encuentra un momento después? Si ese es el caso, una comprensión más profunda de la física debería proporcionar *esa* información y prescindir del marco más burdo de probabilidades. Pero el físico danés Niels Bohr y su séquito de defensores de la mecánica cuántica no estaban de acuerdo. Este razonamiento,

sostenían, tiene sus raíces en el pensamiento convencional, según el cual cada electrón sigue un camino único y definido mientras deambula de un lado a otro. Y este pensamiento se ve fuertemente cuestionado por la figura 4.4, ya que si cada electrón siguiera un camino definido -como la imagen clásica de una bala disparada con un fusil- sería extremadamente difícil explicar el patrón de interferencia observado: ¿qué estaría interfiriendo con qué? Las balas ordinarias disparadas una a una desde un solo cañón ciertamente no pueden interferir entre sí, así que si los electrones viajaran como las balas, ¿cómo explicaríamos el patrón de la figura 4.4?

En cambio, según Bohr y la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica que defendió con fuerza, *antes de medir la posición del electrón no tiene sentido ni siquiera preguntar dónde está.* No tiene una posición definida. La onda de probabilidad codifica la probabilidad de que el electrón, cuando se examina adecuadamente, se encuentre aquí o allá, y eso es realmente todo lo que se puede decir sobre su posición. Punto. El electrón tiene una posición definida en el sentido intuitivo habitual sólo en el momento en que lo "miramos" -en el momento en que medimos su posición- identificando su ubicación con certeza. Pero antes (y después) de hacerlo, todo lo que tiene son posiciones potenciales descritas por una onda de probabilidad que, como cualquier onda, está sujeta a efectos de interferencia. No es que el electrón tenga una posición y que no sepamos la posición antes de hacer nuestra medición. Más bien, contrariamente a lo que se esperaría, el electrón simplemente *no tiene* una posición definida antes de que se haga la medición.

Esta es una realidad radicalmente extraña. Desde este punto de vista, cuando medimos la posición del electrón no estamos midiendo una característica objetiva y preexistente de la realidad. Más bien, el acto de medición está profundamente enredado en la creación de la misma realidad que está midiendo. Escalando esto desde los electrones a la vida cotidiana, Einstein bromeó, "¿Realmente crees que la Luna no está ahí a menos que la estemos mirando?" Los adeptos de la mecánica cuántica respondieron con una versión de la vieja sierra sobre un árbol que caía en un bosque: si nadie está mirando la luna, si nadie está "midiendo su ubicación viéndola", entonces no hay manera de que sepamos si está ahí, así que no tiene sentido hacer la pregunta. Einstein encontró esto profundamente insatisfactorio. Estaba muy en desacuerdo con su concepción de la realidad; creía firmemente que la Luna está ahí, tanto si alguien la está mirando como si no. Pero los estandartes cuánticos no estaban convencidos.

El segundo desafío de Einstein, planteado en la conferencia de Solvay en 1930, siguió de cerca al primero. Describió un dispositivo hipotético, que (a través de una ingeniosa combinación de una escala, un reloj y un obturador tipo cameral) parecía establecer que una partícula como un electrón *debe* tener características definidas - antes de ser medida o examinada - que la mecánica cuántica decía que no podía. Los detalles no son esenciales pero la resolución es particularmente

irónica. Cuando Bohr se enteró del desafío de Einstein, se puso de rodillas. Al principio, no pudo ver un fallo en el argumento de Einstein. Sin embargo, a los pocos días, se recuperó y refutó completamente la afirmación de Einstein. Y lo sorprendente es que la clave de la respuesta de Bohr fue la relatividad general. Bohr se dio cuenta de que Einstein no había tenido en cuenta su propio descubrimiento de que la gravedad distorsiona el tiempo, que un reloj funciona a un ritmo que depende del campo gravitatorio que experimenta. Cuando se incluyó esta complicación, Einstein se vio obligado a admitir que sus conclusiones coincidían con la teoría cuántica ortodoxa.

A pesar de que sus objeciones fueron rechazadas, Einstein siguió estando profundamente incómodo con la mecánica cuántica. En los años siguientes mantuvo a Bohr y a sus colegas en alerta, nivelando un nuevo desafío tras otro. Su ataque más potente y de mayor alcance se centró en algo conocido como el *principio de incertidumbre,* una consecuencia directa de la mecánica cuántica, enunciado en 1927 por Werner Heisenberg.

Heisenberg y la incertidumbre

El principio de incertidumbre proporciona una medida cuantitativa y aguda de cuánta probabilidad está tejida en el tejido de un universo cuántico. Para entenderlo, piense en los menús de precio fijo de ciertos restaurantes chinos. Los platos están dispuestos en dos columnas, A y B, y si, por ejemplo, se pide el primer plato en la columna A, no se puede pedir el primer plato en la columna B; si se pide el segundo plato en la columna A, no se puede pedir el segundo plato en la columna B, y así sucesivamente. De esta manera, el restaurante ha establecido un dualismo dietético, una complementariedad culinaria (una, en particular, que está diseñada para evitar que se acumulen los platos más caros). En el menú del premio fijo se puede comer pato pekinés o langosta cantonesa, pero no ambos.

El principio de incertidumbre de Heisenberg es similar. Dice, a grandes rasgos, que las características físicas del reino microscópico (posiciones de las partículas, velocidades, energías, momentos angulares, etc.) pueden dividirse en dos listas, A y B. Y como descubrió Heisenberg, el conocimiento de la primera característica de la lista A compromete fundamentalmente su capacidad para tener conocimiento de la primera característica de la lista B; el conocimiento de la segunda característica de la lista A compromete fundamentalmente su capacidad para tener conocimiento de la segunda característica de la lista B; y así sucesivamente. Además, al igual que se permite un plato que contiene pato pekinés y langosta cantonesa, pero sólo en proporciones que suman el mismo precio total, cuanto más preciso sea el conocimiento de una característica de una lista, menos preciso puede ser el conocimiento de la característica correspondiente de la segunda lista. La incapacidad fundamental para determinar simultáneamente todas las

características de ambas listas - para determinar con certeza todas estas características del reino microscópico - es la incertidumbre revelada por el principio de Heisenberg.

Por ejemplo, cuanto más precisamente se sabe dónde está una partícula, menos precisamente se puede saber su velocidad. Del mismo modo, cuanto más precisamente se sabe la velocidad de una partícula, menos se puede saber dónde está. La teoría cuántica establece así su propia dualidad: puede determinar con precisión ciertas características físicas del reino microscópico, pero al hacerlo elimina la posibilidad de determinar con precisión ciertas otras características complementarias.

Para entender por qué, sigamos una descripción aproximada desarrollada por el propio Heisenberg, que, aunque incompleta en formas particulares que discutiremos, da una imagen intuitiva útil. Cuando medimos la posición de cualquier objeto, generalmente interactuamos con él de alguna manera. Si buscamos el interruptor de la luz en una habitación oscura, sabemos que lo hemos localizado cuando lo tocamos. Si un murciélago está buscando un ratón de campo, rebota el sonar en su objetivo e interpreta la onda reflejada. El caso más común de todos es localizar algo viéndolo, recibiendo la luz que se ha reflejado en el objeto y ha entrado en nuestros ojos. El punto clave es que estas interacciones no sólo nos afectan a nosotros, sino también al objeto cuya posición se está determinando. Incluso la luz, al rebotar en un objeto, le da un pequeño empujón. Ahora, para los objetos cotidianos como el libro en la mano o un reloj en la pared, el pequeño empujón de la luz que rebota no tiene ningún efecto notable. Pero cuando golpea una pequeña partícula como un electrón puede tener un gran efecto: cuando la luz rebota en el electrón, cambia la velocidad del electrón, de la misma manera que tu propia velocidad se ve afectada por un fuerte viento racheado que azota una esquina. De hecho, cuanto más precisamente se quiere identificar la posición del electrón, más definido y enérgico debe ser el rayo de luz, produciendo un efecto aún mayor en el movimiento del electrón.

Esto significa que si se mide la posición de un electrón con gran precisión, necesariamente se contamina el propio experimento: el acto de medir con precisión la posición interrumpe la velocidad del electrón. Por lo tanto, se puede saber con precisión dónde está el electrón, pero tampoco se puede saber con precisión la velocidad, en ese momento, que se estaba moviendo. Por el contrario, puedes medir con precisión la velocidad de movimiento de un electrón, pero al hacerlo contaminarás tu capacidad de determinar con precisión su posición. La naturaleza tiene un límite incorporado en la precisión con la que se pueden determinar tales características complementarias. Y aunque nos centramos en los electrones, el principio de incertidumbre es completamente general: se aplica a todo.

En la vida cotidiana hablamos rutinariamente de cosas como que un coche pasa una determinada señal de stop (posición) mientras viaja a 90 millas por hora (velocidad), especificando alegremente estas dos características físicas. En realidad, la mecánica cuántica dice que tal afirmación no tiene un significado preciso, ya que nunca se puede medir simultáneamente una posición definida y una velocidad definida. La razón por la que nos salimos con la nuestra en descripciones tan incorrectas del mundo físico es que en las escalas cotidianas la cantidad de incertidumbre involucrada es diminuta y generalmente pasa desapercibida. El principio de Heisenberg no sólo declara la incertidumbre, sino que también especifica, con total certeza, la *cantidad* mínima de incertidumbre en cualquier situación. Si aplicamos su fórmula a la velocidad de tu auto justo cuando pasa una señal de alto cuya posición se conoce en un centímetro, entonces la incertidumbre en la velocidad resulta ser apenas una milmillonésima de una milmillonésima de una milmillonésima de un kilómetro por hora. Un policía estatal estaría cumpliendo plenamente con las leyes de la física cuántica si afirmara que su velocidad está entre 89,99999999999999999999999999999999999999 y 90,00000000000000000000000000000000000001 millas por hora al pasar por la señal de stop; hasta aquí la posible defensa del principio de incertidumbre. Pero si reemplazáramos tu enorme auto por un delicado electrón cuya posición supiéramos a una mil millonésima de metro, entonces la incertidumbre en su velocidad sería la friolera de 100.000 millas por hora. La incertidumbre siempre está presente, pero sólo se vuelve significativa en escalas microscópicas.

La explicación de la incertidumbre como consecuencia de la inevitable perturbación causada por el proceso de medición ha proporcionado a los físicos una guía intuitiva útil, así como un marco explicativo potente en determinadas situaciones específicas. Sin embargo, también puede ser engañosa. Puede dar la impresión de que la incertidumbre surge sólo cuando los experimentadores torpes se inmiscuyen en las cosas. Esto no es cierto. La incertidumbre está incorporada en la estructura de ondas de la mecánica cuántica y existe independientemente de si realizamos o no alguna medición torpe. Como ejemplo, echemos un vistazo a una onda de probabilidad particularmente simple para una partícula, el análogo de una onda oceánica de suave movimiento, que se muestra en la figura 4.6. Como los picos se mueven uniformemente hacia la derecha, se podría suponer que esta onda describe una partícula que se mueve con la velocidad de los picos de la onda; los experimentos confirman esa suposición. Pero, ¿dónde está la partícula? Dado que la onda está uniformemente extendida por el espacio, no hay forma de decir que el electrón está *aquí* o *allá.* Cuando se mide, literalmente se puede encontrar en cualquier lugar. Por lo tanto, mientras que sabemos con precisión la velocidad a la que se mueve la partícula, hay una gran incertidumbre sobre su posición. Y como ves, esta conclusión no depende de que perturbemos la partícula. Nunca la hemos tocado. En cambio, depende de una característica básica de las ondas: pueden ser dispersadas.

Aunque los detalles se involucran más, un razonamiento similar se aplica a todas las otras formas de onda, por lo que la lección general es clara. En la mecánica cuántica, la incertidumbre simplemente es.



Figura 4.6 Una onda de probabilidad con una sucesión uniforme de picos y valles representa una partícula con una velocidad definida. Pero como los picos y las depresiones están uniformemente repartidos en el espacio, la posición de la partícula es completamente indeterminada. Tiene la misma probabilidad de estar en cualquier lugar.

Einstein, la incertidumbre y la cuestión de la realidad

Una cuestión importante, y que se le puede haber ocurrido, es si el principio de incertidumbre es una declaración sobre lo que podemos saber de la realidad o si es una declaración sobre la realidad misma. ¿Los objetos que componen el universo tienen realmente una posición y una velocidad, como nuestra imagen clásica habitual de casi todo, una pelota de béisbol en vuelo, un corredor en el paseo marítimo, un girasol que sigue lentamente el vuelo del sol a través del cielo, aunque la incertidumbre cuántica nos dice que estas características de la realidad están para siempre más allá de nuestra capacidad de conocerlas simultáneamente, incluso en principio? ¿O es que la incertidumbre cuántica rompe completamente el molde clásico, diciéndonos que la lista de atributos que nuestra intuición clásica atribuye a la realidad, una lista encabezada por las posiciones y velocidades de los ingredientes que componen el mundo, está equivocada? ¿La incertidumbre cuántica nos dice que, en un momento dado, las partículas simplemente no poseen una posición definida y una velocidad definida?

Para Bohr, este tema estaba a la par con un koan Zen. La física sólo se ocupa de cosas que podemos medir. Desde el punto de vista de la física, esa *es* la realidad. Tratar de usar la física para analizar una realidad "más profunda", una más allá de lo que podemos conocer a través de la medición, es como pedirle a la física que analice el sonido de las palmas de una mano. Pero en 1935, Einstein, junto con dos colegas, Boris Podolsky y Nathan Rosen, planteó esta cuestión de una manera tan contundente e inteligente que lo que había comenzado como un aplauso de una mano reverberó durante cincuenta años en un trueno que anunció

un asalto mucho mayor a nuestra comprensión de la realidad de lo que incluso Einstein nunca imaginó.

La intención del artículo de Einstein-Podolsky-Rosen era mostrar que la mecánica cuántica, aunque innegablemente exitosa en hacer predicciones y explicar datos, no podía ser la última palabra con respecto a la física del microcosmos. Su estrategia era simple, y se basaba en las cuestiones que acababan de plantearse: querían demostrar que cada partícula posee una posición y una velocidad definidas en cualquier momento dado, y por lo tanto querían concluir que el principio de incertidumbre revela una limitación fundamental del enfoque de la mecánica cuántica. Si cada partícula tiene una posición y una velocidad, pero la mecánica cuántica no puede ocuparse de estas características de la realidad, entonces la mecánica cuántica sólo proporciona una descripción parcial del universo. La mecánica cuántica, pretendían mostrar, era por lo tanto una teoría incompleta de la realidad física y, tal vez, sólo un peldaño hacia un marco más profundo esperando ser descubierto. En realidad, como veremos, sentaron las bases para demostrar algo aún más dramático: la no-localidad del mundo cuántico.

Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) se inspiraron en parte en la tosca explicación de Heisenberg del principio de incertidumbre: cuando se mide dónde está algo, necesariamente se lo perturba, contaminando así cualquier intento de determinar simultáneamente su velocidad.

Aunque, como hemos visto, la incertidumbre cuántica es más general de lo que indica la explicación de la "perturbación", Einstein, Podolsky y Rosen inventaron lo que parecía ser un convincente e inteligente final que rodeaba *cualquier* fuente de incertidumbre. ¿Qué pasaría si, según sugirieron, se pudiera realizar una medición indirecta tanto de la posición como de la velocidad de una partícula de manera que nunca se entrara en contacto con la propia partícula? Por ejemplo, usando una analogía clásica, imagina que Rod y Todd Flandes deciden hacer un viaje solitario en el recién formado Desierto Nuclear de Springfield. Comienzan de nuevo en el centro del desierto y acuerdan caminar en línea recta, en direcciones opuestas, exactamente a la misma velocidad preestablecida. Imaginen además que, nueve horas más tarde, su padre, Ned, regresando de su caminata por el Monte Springfield, ve a Rod, corre hacia él y le pregunta desesperadamente sobre el paradero de Todd. En ese momento, Todd está muy lejos, pero al preguntar y observar a Rod, Ned puede aprender mucho sobre Todd. Si Rod está exactamente a 45 millas al este de la ubicación inicial, Todd debe estar exactamente a 45 millas al oeste de la ubicación inicial. Si Rod camina a exactamente 5 millas por hora hacia el este, Todd debe caminar a exactamente 5 millas por hora hacia el oeste. Así que aunque Todd está a unos 90 kilómetros, Ned puede determinar su posición y velocidad, aunque indirectamente.

Einstein y sus colegas aplicaron una estrategia similar al dominio cuántico. Hay procesos físicos bien conocidos por los que dos partículas emergen de un lugar común con propiedades que están relacionadas de alguna manera con el movimiento de Rod y Todd. Por ejemplo, si una sola partícula inicial se desintegra en dos partículas de igual masa que vuelan "espalda con espalda" (como un explosivo que dispara dos trozos en direcciones opuestas), algo que es común en el ámbito de la física de las partículas subatómicas, las velocidades de los dos constituyentes serán iguales y opuestas. Además, las posiciones de las dos partículas constituyentes también estarán estrechamente relacionadas, y por simplicidad se puede pensar que las partículas son siempre equidistantes de su origen común.

Una distinción importante entre el ejemplo clásico de Rod y Todd, y la descripción cuántica de las dos partículas, es que aunque podemos decir con certeza que existe una relación definida entre las velocidades de las dos partículas -si se midiera una y se encontrara que se mueve a la izquierda a una velocidad determinada, entonces la otra se movería necesariamente a la derecha a la misma velocidad- no podemos predecir el valor numérico real de la velocidad con la que se mueven las partículas. En cambio, lo mejor que podemos hacer es utilizar las leyes de la física cuántica para predecir la probabilidad de que una velocidad determinada sea la alcanzada. Del mismo modo, si bien podemos decir con certeza que existe una relación definida entre las posiciones de las partículas -si una de ellas se mide en un momento dado y se encuentra en algún lugar, la otra se encuentra necesariamente a la misma distancia del punto de partida pero en la dirección opuesta-, no podemos predecir con certeza la ubicación real de ninguna

de las dos partículas. En cambio, lo mejor que podemos hacer es predecir la probabilidad de que una de las partículas esté en cualquier lugar elegido. Así pues, si bien la mecánica cuántica no da respuestas definitivas sobre las velocidades o posiciones de las partículas, en ciertas situaciones sí da afirmaciones definitivas sobre las *relaciones* entre las velocidades y posiciones de las partículas.

Einstein, Podolsky y Rosen buscaron explotar estas relaciones para mostrar que cada una de las partículas tiene en realidad una posición definida y una velocidad definida en cada instante de tiempo. Así es como: imagina que mides la posición de la partícula que se mueve a la derecha y de esta manera aprendes, indirectamente, la posición de la partícula que se mueve a la izquierda. EPR argumentó que como no has hecho nada, absolutamente nada, a la partícula que se mueve a la izquierda, debe *tener*esta posición, y todo lo que has hecho es determinarla, aunque indirectamente. Luego, inteligentemente señalaron que se podría haber elegido en su lugar medir la velocidad de la partícula que se mueve a la derecha. En ese caso usted habría determinado, indirectamente, la velocidad de la partícula que se mueve a la izquierda sin perturbarla en absoluto. Una vez más, EPR argumentó que como usted no habría hecho nada, absolutamente nada, a la partícula que se mueve a la izquierda, debe haber *tenido* esta velocidad, y todo lo que habría hecho es determinarla. Poniendo ambas cosas juntas, la medición que usted hizo y la que *podría* haber hecho, EPR concluyó que la partícula que se mueve a la izquierda tiene una posición definida y una velocidad definida en cualquier momento dado.

Como esto es sutil y crucial, déjame decirlo de nuevo. EPR razonó que nada en su acto de medir la partícula que se mueve a la derecha podría tener algún efecto en la partícula que se mueve a la izquierda, porque son entidades separadas y distantes. La partícula que se mueve a la izquierda es totalmente ajena a lo que usted ha hecho o podría haber hecho a la partícula que se mueve a la derecha. Las partículas pueden estar a metros, kilómetros o años luz de distancia cuando haces tu medición en la partícula que se mueve a la derecha, así que, en resumen, a la partícula que se mueve a la izquierda no podría importarle menos lo que haces. Por lo tanto, cualquier característica que realmente aprenda o pueda en principio aprender sobre la partícula que se mueve a la izquierda a partir del estudio de su contraparte que se mueve a la derecha debe ser una característica *definida y existente* de la partícula que se mueve a la izquierda, totalmente independiente de su medición. Y como si hubieras medido la posición de la partícula derecha habrías aprendido la posición de la partícula izquierda, y si hubieras medido la velocidad de la partícula derecha habrías aprendido la velocidad de la partícula izquierda, debe ser que la partícula que se mueve a la izquierda realmente tiene tanto una posición como una velocidad definidas. Por supuesto, toda esta discusión podría llevarse a cabo intercambiando los papeles de las partículas que se mueven a la izquierda y las que se mueven a la derecha (y, de hecho, antes de hacer cualquier medición ni siquiera podemos decir qué

partícula se mueve a la izquierda y cuál a la derecha); esto lleva a la conclusión de que ambas partículas tienen posiciones y velocidades definidas.

Así, la EPR concluyó que la mecánica cuántica es una descripción incompleta de la realidad. Las partículas tienen posiciones y velocidades definidas, pero el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica muestra que estas características de la realidad están más allá de los límites de lo que la teoría puede manejar. Si, de acuerdo con estos y la mayoría de los demás físicos, usted cree que una teoría completa de la naturaleza debería describir cada atributo de la realidad, el fracaso de la mecánica cuántica para describir tanto las posiciones como las velocidades de las partículas significa que pierde algunos atributos y, por lo tanto, no es una teoría completa; no es la última palabra. Eso es lo que Einstein, Podolsky y Rosen argumentaron enérgicamente.

La respuesta cuántica

Aunque EPR concluyó que cada partícula tiene una posición y velocidad definidas en un momento dado, note que si sigue su procedimiento se quedará corto para determinar realmente estos atributos. Dije, arriba, que podrías haber elegido medir la velocidad de la partícula en movimiento. Si lo hubieras hecho, habrías perturbado su posición; por otra parte, si hubieras elegido medir su posición habrías perturbado su velocidad. Si no tienes estos dos atributos de la partícula que se mueve a la derecha, tampoco los tienes para la partícula que se mueve a la izquierda. Por lo tanto, no hay conflicto *con el principio de incertidumbre:* Einstein y sus colaboradores reconocieron plenamente que no podían identificar tanto la ubicación como la velocidad de ninguna partícula dada. Pero, y esto es clave, incluso sin determinar tanto la posición como la velocidad de ninguna de las partículas, el razonamiento de EPR muestra que cada una *tiene* una posición y una velocidad definidas. Para ellos, era una cuestión de realidad. Para ellos, una teoría no podría pretender ser completa si hubiera elementos de la realidad que no pudiera describir.

Después de un poco de escabullirse intelectualmente en respuesta a esta inesperada observación, los defensores de la mecánica cuántica se asentaron en su habitual enfoque pragmático, bien resumido por el eminente físico Wolfgang Pauli: "Uno no debería atormentarse más con el problema de si algo de lo que no se puede saber nada existe de todas formas, que con la antigua pregunta de cuántos ángeles son capaces de sentarse en la punta de una aguja".[9] La física en general, y la mecánica cuántica en particular, sólo puede tratar con las propiedades medibles del universo. Cualquier otra cosa simplemente no está en el dominio de la física. Si no se puede medir tanto la posición como la velocidad de una partícula, entonces no tiene sentido hablar de si tiene tanto una posición como una velocidad.

La EPR no está de acuerdo. La realidad, sostenían, era más que las lecturas de los detectores; era más que la suma total de todas las observaciones en un momento dado. Cuando nadie, absolutamente nadie, ningún dispositivo, ningún equipo, nada en absoluto está "mirando" a la Luna, creían, la Luna todavía estaba allí. Creían que todavía era parte de la realidad.

En cierto modo, este punto muerto se hace eco del debate entre Newton y Leibniz sobre la realidad del espacio. ¿Puede considerarse que algo es real si no podemos tocarlo, verlo o medirlo de alguna manera? En el capítulo 2, describí cómo el cubo de Newton cambió el carácter del debate sobre el espacio, sugiriendo repentinamente que una influencia del espacio podía ser observada directamente, en la superficie curva del agua que gira. En 1964, en un único y asombroso golpe que un comentarista ha llamado "el más profundo descubrimiento de la ciencia" [10], el físico irlandés John Bell hizo lo mismo para el debate sobre la realidad cuántica.

En las siguientes cuatro secciones, describiremos el descubrimiento de Bell, evitando juiciosamente todos los tecnicismos excepto uno mínimo. De todos modos, aunque la discusión utiliza un razonamiento menos sofisticado que el de un juego de dados, implica un par de pasos que debemos describir y luego enlazar. Dependiendo de tu gusto particular por los detalles, puede llegar un punto en el que sólo quieras el remate. Si esto ocurre, no dudes en saltar a la página 112, donde encontrarás un resumen y una discusión de las conclusiones derivadas del descubrimiento de Bell.

y giro

John Bell transformó la idea central del artículo de Einstein-Podolsky-Rosen de la especulación filosófica en una pregunta que podría ser respondida por una medición experimental concreta. Sorprendentemente, todo lo que necesitaba para lograrlo era considerar una situación en la que no sólo había dos características -por ejemplo, la posición y la velocidad- que la incertidumbre cuántica nos impide determinar simultáneamente. Demostró que si hay tres o más características que se encuentran simultáneamente bajo el paraguas de la incertidumbre -tres o más características con la propiedad de que al medir una, se contaminan las otras y por lo tanto no se puede determinar nada sobre ellas- entonces *hay* un experimento para abordar la cuestión de la realidad. El ejemplo más simple de este tipo implica algo conocido como giro.

Desde la década de 1920, los físicos han sabido que las partículas giran - ejecutan un movimiento rotativo similar al de un balón de fútbol que gira cuando se dirige a la meta. El giro de las partículas cuánticas, sin embargo, difiere de esta imagen clásica en varios aspectos esenciales, y los más importantes para nosotros son los siguientes dos puntos. Primero, las partículas -por ejemplo, los electrones y los

fotones- pueden girar sólo en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario a una velocidad que nunca cambia sobre un eje en particular; el eje de giro de una partícula puede cambiar de dirección pero su velocidad de giro no puede disminuir ni acelerar. En segundo lugar, la incertidumbre cuántica aplicada al spin muestra que, al igual que no se puede determinar simultáneamente la posición y la velocidad de una partícula, tampoco se puede determinar simultáneamente el spin de una partícula sobre más de un eje. Por ejemplo, si un balón de fútbol está girando sobre un eje que apunta al noreste, su espín se comparte entre un eje que apunta al norte y otro que apunta al este, y mediante una medición adecuada, se podría determinar la fracción de espín sobre cada uno. Pero si se mide el spin de un electrón sobre cualquier eje elegido al azar, nunca se encuentra una cantidad fraccional de spin. Nunca. Es como si la propia medición obligara al electrón a reunir todo su movimiento de giro y lo dirigiera a estar en el sentido de las agujas del reloj o en el sentido contrario al de las agujas del reloj alrededor del eje en el que te has centrado. Además, debido a la influencia de tu medición en el giro del electrón, pierdes la capacidad de determinar cómo estaba girando sobre un eje horizontal, sobre un eje de vaivén o sobre cualquier otro eje, antes de tu medición. Estas características del giro de la mecánica cuántica son difíciles de imaginar en su totalidad, y la dificultad pone de relieve los límites de las imágenes clásicas para revelar la verdadera naturaleza del mundo cuántico. Sin embargo, las matemáticas de la teoría cuántica, y décadas de experimentación, nos aseguran que estas características del espín cuántico están fuera de toda duda.

La razón para introducir el espín aquí no es para ahondar en las complejidades de la física de partículas. Más bien, el ejemplo del espín de partículas proporcionará, en un momento, un simple laboratorio para extraer respuestas maravillosamente inesperadas a la pregunta de la realidad. Es decir, ¿tiene una partícula simultáneamente *una* cantidad definida de espín en todos y cada uno de los ejes, aunque nunca podamos saberlo en más de un eje a la vez debido a la incertidumbre cuántica? ¿O el principio de incertidumbre nos dice algo más? ¿Nos dice, contrariamente a cualquier noción clásica de la realidad, que una partícula simplemente no posee y no puede poseer tales características simultáneamente? ¿Nos dice que una partícula reside en un estado de limbo cuántico, sin tener un giro definido sobre un eje determinado, hasta que alguien o algo la mide, haciendo que llame la atención y alcance -con una probabilidad determinada por la teoría cuántica- un valor de giro particular u otro (en el sentido de las agujas del reloj o en el sentido contrario) sobre el eje seleccionado? Estudiando esta pregunta, esencialmente la misma que formulamos en el caso de las posiciones y velocidades de las partículas, podemos utilizar el espín para sondear la naturaleza de la realidad cuántica (y para extraer respuestas que trascienden en gran medida el ejemplo específico del espín). Veamos esto.

Como ha demostrado explícitamente el físico David Bohm, [11] el razonamiento de Einstein, Podolsky y Rosen puede extenderse fácilmente a la cuestión de si las

partículas tienen giros definidos sobre todos y cada uno de los ejes elegidos. Así es como funciona. Ponga dos detectores capaces de medir el espín de un electrón entrante, uno en el lado izquierdo del laboratorio y el otro en el lado derecho. Disponga que dos electrones emanen espalda con espalda de una fuente a medio camino entre los dos detectores, de tal manera que sus giros, en lugar de sus posiciones y velocidades como en nuestro ejemplo anterior, estén correlacionados. Los detalles de cómo se hace esto no son importantes; lo importante es que se puede hacer y, de hecho, se puede hacer fácilmente. La correlación puede arreglarse de manera que si los detectores izquierdo y derecho se ajustan para medir los giros a lo largo de ejes que apuntan en la misma dirección, obtendrán el mismo resultado: si los detectores se ajustan para medir el giro de sus respectivos electrones entrantes sobre un eje vertical y el detector izquierdo encuentra que el giro es en el sentido de las agujas del reloj, también lo hará el detector derecho; si los detectores se ajustan para medir el giro a lo largo de un eje de 60 grados en el sentido de las agujas del reloj desde la vertical y el detector izquierdo mide un giro en el sentido contrario a las agujas del reloj, también lo hará el detector derecho; y así sucesivamente. Una vez más, en la mecánica cuántica lo mejor que podemos hacer es predecir la probabilidad de que los detectores encuentren un giro en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario a las agujas del reloj, pero podemos predecir con una certeza del 100 por ciento que lo que un detector encuentre el otro también lo encontrará.[7]

El refinamiento de Bohm del argumento de la EPR es ahora, a todos los efectos, el mismo que en la versión original que se centraba en la posición y la velocidad. La correlación entre los giros de las partículas nos permite medir indirectamente el giro de la partícula que se mueve a la izquierda sobre algún eje, midiendo el de su compañera que se mueve a la derecha sobre ese eje. Dado que esta medición se hace lejos, en el lado derecho del laboratorio, no puede influir en la partícula que se mueve a la izquierda de ninguna manera. Por lo tanto, esta última debe haber tenido todo el tiempo el valor de espín recién determinado; todo lo que hicimos fue medirlo, aunque indirectamente. Además, como podríamos haber elegido realizar esta medición sobre *cualquier eje*, la misma conclusión debe valer para cualquier eje: el electrón que se mueve a la izquierda debe tener un espín definido sobre todos y cada uno de los ejes, aunque sólo podamos determinarlo explícitamente sobre un eje a la vez. Por supuesto, los papeles de la izquierda y la derecha pueden invertirse, lo que lleva a la conclusión de que cada partícula tiene un giro definido sobre cualquier eje. [12]

En esta etapa, al no ver ninguna diferencia obvia con el ejemplo de la posición/velocidad, podría tomar la iniciativa de Pauli y estar tentado de responder que no tiene sentido pensar en tales cuestiones. Si no se puede medir el giro en diferentes ejes, ¿qué sentido tiene preguntarse si la partícula tiene, no obstante, un giro definido en sentido horario o antihorario en cada uno de ellos? La mecánica cuántica, y la física en general, sólo está obligada a dar cuenta de las características del mundo que pueden ser medidas. Y ni Bohm, ni Einstein, ni

Podolsky, ni Rosen habrían argumentado que las mediciones pueden hacerse. En cambio, argumentaron que las partículas poseen características prohibidas por el principio de incertidumbre, aunque nunca podamos conocer explícitamente sus valores particulares. Tales características han llegado a conocerse como *características ocultas,* o, más comúnmente, *variables ocultas.*

Aquí es donde John Bell cambió todo. Descubrió que incluso si no se puede determinar el giro de una partícula sobre más de un eje, aún así, si de hecho *tiene* un giro definido sobre todos los ejes, entonces hay consecuencias comprobables y observables de ese giro.

Prueba de realidad

Para entender lo esencial de la perspicacia de Bell, volvamos a Mulder y Scully e imaginemos que cada uno de ellos ha recibido otro paquete, que también contiene cajas de titanio, pero con una importante novedad. En lugar de tener una puerta, cada caja de titanio tiene tres: una arriba, una a los lados y una en el frente. [13] La carta de acompañamiento les informa que la esfera dentro de cada caja ahora elige al azar entre el rojo y el azul intermitente cuando se abre cualquiera de las tres puertas de la caja. Si se abriera una puerta diferente (superior versus lateral versus frontal) en una caja dada, el color seleccionado al azar por la esfera podría ser diferente, pero una vez que se abre una puerta y la esfera ha parpadeado, no hay manera de determinar lo que habría sucedido si se hubiera elegido otra puerta. (En la aplicación de física, esta característica captura la incertidumbre cuántica: una vez que se mide una característica no se puede determinar nada sobre las otras). Finalmente, la carta les dice que hay otra vez una misteriosa conexión, un extraño enredo, entre los dos juegos de cajas de titanio: Aunque todas las esferas *eligen al azar de* qué color parpadearán cuando se abra una de las tres puertas de su caja, si tanto Mulder como Scully abren por casualidad la *misma* puerta en una caja con el *mismo* número, la carta predice que verán el mismo color de parpadeo. Si Mulder abre la puerta superior de su caja 1 y ve el azul, entonces la letra predice que Scully también verá el azul si abre la puerta superior de su caja 1; si Mulder abre la puerta lateral de su caja 2 y ve el rojo, entonces la letra predice que Scully también verá el rojo si abre la puerta lateral de su caja 2, y así sucesivamente. De hecho, cuando Scully y Mulder abren las primeras docenas de cajas, acordando por teléfono qué puerta abrir en cada una, verifican las predicciones de la carta.

Aunque a Mulder y Scully se les presenta una situación algo más complicada que antes, a primera vista parece que el mismo razonamiento que Scully utilizó antes se aplica igualmente bien aquí.

"Mulder", dice Scully, "esto es tan tonto como el paquete de ayer". Una vez más, no hay ningún misterio. La esfera dentro de cada caja debe ser simplemente programada. ¿No lo ves?"

"Pero ahora hay tres puertas, advierte Mulder, así que la esfera no puede saber qué puerta elegiremos para abrir, ¿verdad?

"No es necesario", explica Scully. "Eso es parte de la programación. Mira, aquí hay un ejemplo. Agarra la siguiente caja sin abrir, la caja 37, y yo haré lo mismo. Ahora, imagina, por el bien del argumento, que la esfera en mi caja 37 está programada, digamos, para parpadear en rojo si la puerta superior está abierta, para parpadear en azul si la puerta lateral está abierta, y para parpadear en rojo si la puerta frontal está abierta. Llamaré a este programa *rojo, azul, rojo.* Claramente, entonces, si quien nos está enviando esto ha introducido este mismo programa en su caja 37, y si ambos abrimos la misma puerta, veremos el mismo color de flash. Esto explica la "conexión misteriosa": si las cajas de nuestras respectivas colecciones con el mismo número han sido programadas con las mismas instrucciones, entonces veremos el mismo color si abrimos la misma puerta. *¡No* hay ningún misterio!"

Pero Mulder no cree que las esferas estén programadas. Cree en la carta. Él cree que las esferas están eligiendo al azar entre el rojo y el azul cuando una de las puertas de su caja se abre y por lo tanto cree, fervientemente, que su caja y la de Scully tienen alguna misteriosa conexión de largo alcance.

¿Quién tiene razón? Dado que no hay forma de examinar las esferas antes o durante la supuesta selección aleatoria de color (recuerde, cualquier manipulación de este tipo hará que la esfera elija instantáneamente al azar entre el rojo o el azul, confundiendo cualquier intento de investigar cómo funciona realmente), parece imposible probar definitivamente si Scully o Mulder tiene razón.

Sin embargo, sorprendentemente, después de pensarlo un poco, Mulder se da cuenta de que *hay*un experimento que resolverá la cuestión por completo. El razonamiento de Mulder es sencillo, pero requiere un razonamiento matemático más explícito que la mayoría de las cosas que cubrimos. Definitivamente vale la pena tratar de seguir los detalles - no hay tantos - pero no se preocupe si alguno de ellos se escapa; en breve resumiremos la conclusión clave.

Mulder se da cuenta de que hasta ahora él y Scully sólo han considerado lo que pasa si cada uno abre la misma puerta en una caja con un número determinado. Y, como le dice emocionado a Scully después de llamarla, hay mucho que aprender si no escogen siempre la misma puerta y, en su lugar, escogen al azar e independientemente qué puerta abrir en cada una de sus cajas.

"Mulder, por favor. Sólo déjame disfrutar de mis vacaciones. ¿Qué podemos aprender haciendo eso?"

"Bueno, Scully, podemos determinar si tu explicación es correcta o incorrecta".

"Vale, tengo que oír esto".

"Es simple", continúa Mulder. "Si tienes razón, entonces esto es lo que me di cuenta: si tú y yo, por separado y al azar, elegimos qué puerta abrir en una caja determinada y registramos el color que vemos el flash, entonces, después de hacer esto para muchas cajas debemos encontrar que vimos el mismo color de flash *más* del 50 por ciento de las veces. Pero si no es así, si encontramos que no estamos de acuerdo en el color para más del 50 por ciento de las cajas, entonces no puedes estar en lo cierto."

"En serio, ¿cómo es eso?" Scully se está interesando un poco más.

"Bueno", continúa Mulder, "aquí hay un ejemplo. Supongamos que tienes razón y que cada esfera funciona según un programa. Para ser concreto, imagina que el programa de la esfera en una caja particular resulta ser *azul, azul, rojo.* Ahora bien, como ambos elegimos entre tres puertas, hay un total de nueve posibles combinaciones de puertas que podríamos seleccionar para abrir esta caja. Por ejemplo, yo podría elegir la puerta superior de mi caja mientras que tú podrías elegir la puerta lateral de tu caja; o podría elegir la puerta principal y tú podrías elegir la puerta superior; y así sucesivamente."

"Sí, por supuesto". Scully salta. "Si llamamos a la puerta superior 1, a la puerta lateral 2 y a la puerta delantera 3, entonces las nueve combinaciones de puertas posibles son sólo (1,1), (1,2), (1,3), (2,1), (2,2), (2,3), (3,1), (3,2), (3,3)."

"Sí, así es", continúa Mulder. "Este es el punto: De estas nueve posibilidades note que cinco combinaciones de puertas-(1,1), (2,2), (3,3), (1,2), (2,1)-resultarán en que veamos que las esferas en nuestras cajas destellan del mismo color. Las tres primeras combinaciones de puertas son aquellas en las que elegimos la misma puerta, y como sabemos, eso *siempre* resulta en que veamos el mismo color. Las otras dos combinaciones de puertas, (1,2) y (2,1), dan como resultado el mismo color porque el programa dicta que las esferas destellen el mismo color -azul- si se abre la puerta 1 o la puerta 2. Ahora, ya que 5 es más de la mitad de 9, esto significa que para más de la mitad -más del 50 por ciento- de la posible combinación de puertas que podríamos seleccionar para abrir, las esferas destellarán del mismo color".

"Pero espera", protesta Scully. "Ese es sólo un ejemplo de un programa en particular: *azul, azul, rojo.* En mi explicación, propuse que las cajas numeradas de forma diferente pueden y generalmente tendrán programas diferentes."

"En realidad, eso no importa. La conclusión es válida para todos los programas posibles. Verán, mi razonamiento con el programa *azul, azul, rojo* sólo se basó en el hecho de que dos de los colores del programa son los mismos, por lo que se

llega a una conclusión idéntica para cualquier programa: *rojo, rojo, azul,* o *rojo, azul, rojo,* etc. Cualquier programa tiene que tener al menos dos colores iguales; los únicos programas que son realmente diferentes son aquellos en los que los tres colores son iguale*, rojo, rojo* y *azul, azul, azul.* Pero para las cajas con cualquiera de estos programas, conseguiremos que el mismo color parpadee independientemente de las puertas que abramos, y así la fracción total en la que deberíamos estar de acuerdo sólo aumentará. Así que, si su explicación es correcta y las cajas funcionan según los programas, incluso con programas que varían de una caja numerada a otra, debemos estar de acuerdo en el color que vemos *más* del 50 por ciento de las veces".

Ese es el argumento. La parte difícil ya ha terminado. La conclusión es que *hay*una prueba para determinar si Scully es correcta y cada esfera funciona según un programa que determina definitivamente el color del flash dependiendo de la puerta que se abra. Si ella y Mulder, de forma independiente y aleatoria, eligen cuál de las tres puertas de cada una de sus cajas abrir, y luego comparan los colores que ven - caja por caja numerada - deben encontrar un acuerdo para *más* del 50 por ciento de las cajas.

Cuando se presenta en el lenguaje de la física, como será en la próxima sección, la realización de Mulder no es más que el avance de John Bell.

Contar los ángeles con ángulos

La traducción de este resultado a la física es sencilla. Imaginemos que tenemos dos detectores, uno a la izquierda del laboratorio y otro a la derecha, que miden el espín de una partícula entrante como un electrón, como en el experimento discutido en la sección anterior. Los detectores requieren que se elija el eje (vertical, horizontal, adelante-atrás, o uno de los innumerables ejes que se encuentran entre ellos) a lo largo del cual se debe medir el espín; para simplificar, imaginemos que tenemos detectores de bajo costo que ofrecen sólo tres opciones para los ejes. En cualquier ejecución del experimento, encontrarás que el electrón entrante está girando en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario a las agujas del reloj alrededor del eje que has seleccionado.

Según Einstein, Podolsky y Rosen, cada electrón entrante proporciona al detector en el que entra lo que equivale a un programa: Aunque está oculto, aunque no se puede medir, EPR afirmó que cada electrón tiene una cantidad definida de giro, ya sea en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario, sobre todos y cada uno de los ejes. Por lo tanto, cuando un electrón entra en un detector, el electrón determina definitivamente si medirás su spin en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario a las agujas del reloj sobre cualquier eje que elijas. Por ejemplo, un electrón que está girando en el sentido de las agujas *del* reloj alrededor de cada uno de los tres ejes proporciona el programa en el sentido de

las agujas del reloj, *en el sentido de las agujas del reloj;* un electrón que está girando en el sentido de las agujas del reloj alrededor de los dos primeros ejes y en el sentido contrario a las agujas del reloj alrededor del tercero proporciona el programa en el sentido de las agujas del reloj*, en el sentido contrario a las agujas del reloj,* y así sucesivamente. Para explicar la correlación entre los electrones que se mueven a la izquierda y los que se mueven a la derecha, Einstein, Podolsky y Rosen simplemente afirman que tales electrones tienen giros idénticos y por lo tanto proporcionan a los detectores en los que entran programas idénticos. Así, si se escogen los mismos ejes para los detectores izquierdo y derecho, los detectores de espín encontrarán resultados idénticos.

Obsérvese que estos detectores de giro reproducen exactamente todo lo que encuentran Scully y Mulder, aunque con simples sustituciones: en lugar de elegir una puerta en una caja de titanio, estamos eligiendo un eje; en lugar de ver un destello rojo o azul, registramos un giro en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario. Así, al igual que abrir las mismas puertas en un par de cajas de titanio idénticamente numeradas da como resultado el mismo color de los destellos, elegir los mismos ejes en los dos detectores da como resultado la misma dirección de giro que se mide. Además, al igual que abrir una puerta en particular en una caja de titanio nos impide saber qué color habría parpadeado si hubiéramos elegido otra puerta, medir el spin de los electrones sobre un eje en particular nos impide, por medio de la incertidumbre cuántica, saber qué dirección de spin habríamos encontrado si hubiéramos elegido un eje diferente.

Todo lo anterior significa que el análisis de Mulder de cómo aprender quién tiene la razón se aplica exactamente de la misma manera a esta situación que al caso de las esferas alienígenas. Si la EPR es correcta y cada electrón tiene realmente un valor de espín definido en los tres ejes, si cada electrón proporciona un "programa" que determina definitivamente el resultado de cualquiera de las tres posibles medidas de espín, entonces podemos hacer la siguiente predicción. El escrutinio de los datos recogidos de muchas series del experimento - series en las que el eje de cada detector se selecciona de forma aleatoria e independiente - mostrará que *más de la mitad de las veces, los dos giros de los electrones coinciden, siendo ambos en el sentido de las agujas del reloj o ambos en el sentido contrario.* Si los giros de los electrones no coinciden más de la mitad de las veces, entonces Einstein, Podolsky y Rosen están equivocados.

Este es el descubrimiento de Bell. Muestra que aunque no se puede medir el spin de un electrón en más de un eje, aunque no se puede "leer" explícitamente el programa que se supone que suministra al detector en el que entra, esto *no* significa que tratar de aprender si tiene una cantidad definida de spin en más de un eje sea equivalente a contar ángeles en la cabeza de un alfiler. Lejos de eso. Bell encontró que hay una consecuencia bona fide y comprobable asociada con una partícula que tiene valores de spin definidos. Al usar ejes en tres ángulos, Bell proporcionó una forma de contar los ángeles de Pauli.

No hay humo sino fuego

En caso de que se le haya pasado algún detalle, resumamos dónde hemos llegado. A través del principio de incertidumbre de Heisenberg, la mecánica cuántica afirma que hay características del mundo -como la posición y la velocidad de una partícula, o el giro de una partícula sobre varios ejes- que no pueden tener simultáneamente valores definidos.*Una partícula, según la teoría cuántica, no puede tener una posición y una velocidad definidas; una partícula no puede tener un giro definido (en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario) alrededor de más de un eje; una partícula no puede tener simultáneamente atributos definidos para cosas que se encuentran en lados opuestos de la división de incertidumbre.* En cambio, las partículas se mueven en el limbo cuántico, en una mezcla borrosa, amorfa y probabilística de todas las posibilidades; sólo cuando se mide se selecciona un resultado definido de entre los muchos. Claramente, este es un cuadro de la realidad drásticamente diferente al pintado por la física clásica.

Siempre el escéptico acerca de la mecánica cuántica, Einstein, junto con sus colegas Podolsky y Rosen, trató de usar este aspecto de la mecánica cuántica como un arma contra la teoría misma. EPR argumentó que aunque la mecánica cuántica no permite que tales características se determinen simultáneamente, las partículas tienen valores definidos de posición y velocidad; las partículas tienen valores de espín definidos en todos los ejes; las partículas tienen valores definidos para todas las cosas prohibidas por la incertidumbre cuántica. Así pues, la EPR argumentó que la mecánica cuántica no puede manejar todos los elementos de la realidad física -no puede manejar la posición y la velocidad de una partícula; no puede manejar el spin de una partícula en torno a más de un eje- y por lo tanto es una teoría incompleta.

Durante mucho tiempo, la cuestión de si los EPR eran correctos parecía más una cuestión de metafísica que de física. Como dijo Pauli, si no se pueden medir características prohibidas por la incertidumbre cuántica, ¿qué diferencia podría haber si, no obstante, existen en algún pliegue oculto de la realidad? Pero, sorprendentemente, John Bell encontró algo que se le había escapado a Einstein, Bohr y todos los demás gigantes de la física teórica del siglo XX: descubrió que la mera existencia de ciertas cosas, incluso si están más allá de la medición o determinación explícita, marca una diferencia, una diferencia que puede ser comprobada experimentalmente. Bell demostró que si el EPR era correcto, los resultados encontrados por dos detectores ampliamente separados que miden ciertas propiedades de las partículas (giro sobre varios ejes elegidos al azar, en el enfoque que hemos adoptado) tendrían que coincidir en más del 50 por ciento de las veces.

Bell tuvo esta idea en 1964, pero en ese momento la tecnología no existía para llevar a cabo los experimentos necesarios. A principios de los 70, sí existía.

Comenzando con Stuart Freedman y John Clauser en Berkeley, seguido por Edward Fry y Randall Thompson en Texas A&M, y culminando a principios de los 80 con el trabajo de Alain Aspect y colaboradores que trabajaban en Francia, se llevaron a cabo versiones cada vez más refinadas e impresionantes de estos experimentos. En el experimento de Aspect, por ejemplo, los dos detectores se colocaron a 13 metros de distancia y un contenedor de átomos de calcio energético se colocó a mitad de camino entre ellos. La física bien entendida muestra que cada átomo de calcio, al volver a su estado normal, menos energético, emitirá dos fotones, viajando de vuelta a vuelta, cuyos giros están perfectamente correlacionados, al igual que en el ejemplo de los giros de electrones correlacionados que hemos estado discutiendo. De hecho, en el experimento de Aspect, siempre que los ajustes del detector son los mismos, se mide que los dos fotones tienen espines perfectamente alineados. Si se conectaran luces a los detectores de Aspect para que parpadeen en rojo en respuesta a un giro en el sentido de las agujas del reloj y en azul en respuesta a un giro en el sentido contrario, los fotones entrantes harían que los detectores parpadeen del mismo color.

Pero, y éste es el punto crucial, cuando Aspect examinó los datos de un gran número de ejecuciones del experimento -datos en los que los ajustes de los detectores izquierdo y derecho no eran siempre los mismos sino que variaban de forma aleatoria e independiente de una ejecución a otra- descubrió que *los detectores no estaban de acuerdo en más del 50 por ciento de las ocasiones.*

Este es un resultado que destroza la tierra. Este es el tipo de resultado que debería dejarte sin aliento. Pero por si acaso no lo ha hecho, déjeme explicarle más. Los resultados de Aspect muestran que Einstein, Podolsky, y Rosen fueron probados por experimento, no por teoría, no por reflexión, sino por naturaleza, para estar equivocados. Y eso significa que tiene que haber algo malo en el razonamiento que la EPR utilizó para concluir que las partículas poseen valores definidos para características - como los valores de espín sobre distintos ejes - para los cuales los valores definidos están prohibidos por el principio de incertidumbre.

¿Pero dónde podrían haberse equivocado? Bien, recuerde que el argumento de Einstein, Podolsky y Rosen se basa en una suposición central: si en un momento dado se puede determinar una característica de un objeto mediante un experimento realizado en otro objeto espacialmente distante, entonces el primer objeto debe haber tenido esta característica todo el tiempo. Su fundamento para esta suposición era simple y completamente razonable. Su medición se hizo *aquí* mientras el primer objeto estaba muy lejos. Los dos objetos estaban separados espacialmente, y por lo tanto su medición no podría haber tenido ningún efecto en el primer objeto. Más precisamente, ya que nada va más rápido que la velocidad de la luz, si su medición en un objeto causara de alguna manera un cambio en el otro -por ejemplo, que el otro tomara un movimiento giratorio idéntico sobre un eje

elegido- tendría que haber un retraso antes de que esto pudiera suceder, un retraso al menos tan largo como el tiempo que le tomaría a la luz recorrer la distancia entre los dos objetos. Pero tanto en nuestro razonamiento abstracto como en los experimentos reales, las dos partículas son examinadas por los detectores al *mismo tiempo*. Por lo tanto, todo lo que aprendamos sobre la primera partícula midiendo la segunda debe ser una característica que la primera partícula poseía, completamente independiente de si realizamos la medición en absoluto. En resumen, el núcleo del argumento de Einstein, Podolsky y Rosen es que a *un objeto de all*á no le importa *lo que le hagas a otro objeto de aquí.*

Pero como acabamos de ver, este razonamiento lleva a la predicción de que los detectores deberían encontrar el mismo resultado más de la mitad de las veces, predicción que es refutada por los resultados experimentales. Nos vemos obligados a concluir que la suposición hecha por Einstein, Podolsky y Rosen, no importa lo razonable que parezca, no puede ser cómo funciona nuestro universo cuántico. Así, a través de este razonamiento indirecto, pero cuidadosamente considerado, los experimentos nos llevan a la conclusión de que *un objeto de allá sí se preocupa por lo que le hace a otro objeto de aquí.*

Aunque la mecánica cuántica muestra que las partículas adquieren aleatoriamente tal o cual propiedad cuando se miden, aprendemos que la aleatoriedad puede vincularse a través del espacio. Los pares de partículas apropiadamente preparadas - se llaman partículas *enredadas* - no adquieren sus propiedades medidas independientemente. Son como un par de dados mágicos, uno lanzado en Atlantic City y el otro en Las Vegas, cada uno de los cuales sale al azar con un número u otro, pero los dos de alguna manera se las arreglan para estar siempre de acuerdo. Las partículas enredadas actúan de manera similar, excepto que no requieren de magia. *Las partículas enredadas, aunque estén separadas espacialmente, no operan de forma autónoma.*

Einstein, Podolsky y Rosen se propusieron mostrar que la mecánica cuántica proporciona una descripción incompleta del universo. Medio siglo más tarde, los conocimientos teóricos y los resultados experimentales inspirados por su trabajo requieren que demos vuelta a su análisis y concluyamos que la parte más básica, intuitivamente razonable y clásicamente sensata de su razonamiento está equivocada: el universo no es local. El resultado de lo que se hace en un lugar puede vincularse con lo que sucede en otro lugar, incluso si nada viaja entre los dos lugares, incluso si no hay suficiente tiempo para que nada complete el viaje entre los dos lugares. La sugerencia intuitiva y agradable de Einstein, Podolsky y Rosen de que tales correlaciones de largo alcance surgen simplemente porque las partículas tienen propiedades definidas, preexistentes y correlacionadas, queda descartada por los datos. Eso es lo que hace que todo esto sea tan impactante. [14]

En 1997, Nicolas Gisin y su equipo de la Universidad de Ginebra llevaron a cabo una versión del experimento Aspect en la que los dos detectores se colocaron a

11 kilómetros de distancia. Los resultados no se modificaron. En la escala microscópica de las longitudes de onda de los fotones, 11 kilómetros es gigantesco. Bien podría ser 11 millones de kilómetros o 11 mil millones de años luz, para el caso. Hay muchas razones para creer que la correlación entre los fotones persistiría sin importar cuán lejos estén colocados los detectores.

Esto suena totalmente extraño. Pero ahora hay pruebas abrumadoras de este llamado entrelazamiento cuántico. Si dos fotones se enredan, la medición exitosa del giro de cualquiera de los dos fotones sobre un eje "obliga" al otro, el fotón distante, a tener el mismo giro sobre el mismo eje; el acto de medir un fotón "obliga" al otro, posiblemente el fotón distante, a salir de la neblina de la probabilidad y tomar un valor de giro definitivo, un valor que coincide precisamente con el giro de su compañero distante. Y eso aturde a la mente. [8]

Enredo y Relatividad Especial: La vista estándar

He puesto las palabras "fuerzas" y "obliga" entre comillas porque aunque transmiten el sentimiento que nuestra intuición clásica anhela, su significado preciso en este contexto es crítico para saber si estamos o no ante un trastorno aún mayor. Con sus definiciones cotidianas, estas palabras evocan una imagen de causalidad volitiva: elegimos hacer algo aquí para *causar* o *forzar que algo* particular suceda allá. Si esa fuera la descripción correcta de cómo se interrelacionan los dos fotones, *la relatividad especial estaría contra las cuerdas.* Los experimentos muestran que desde el punto de vista de un experimentador en el laboratorio, en el momento preciso en que se mide el spin de un fotón, el otro fotón adquiere inmediatamente la misma propiedad de spin. Si algo viajara del fotón izquierdo al derecho, alertando al fotón derecho de que el spin del fotón izquierdo se había determinado a través de una medición, tendría que viajar entre los fotones instantáneamente, entrando en conflicto con el límite de velocidad establecido por la relatividad especial.

El consenso entre los físicos es que cualquier conflicto aparente con la relatividad especial es ilusorio. La razón intuitiva es que aunque los dos fotones están separados espacialmente, su origen común establece un vínculo fundamental entre ellos. Aunque se alejan rápidamente el uno del otro y se separan espacialmente, su historia los entrelaza; incluso cuando están distantes, siguen formando parte de un sistema físico. Y así, no es realmente que una medida en un fotón fuerce u obligue a otro fotón distante a asumir propiedades idénticas. Más bien, los dos fotones están tan íntimamente ligados que está justificado considerarlos -aunque estén separados espacialmente- como partes de una entidad física. Entonces podemos decir que una medición de esta única entidad -una entidad que contiene dos fotones- afecta a la entidad; es decir, afecta a ambos fotones a la vez.

Aunque estas imágenes pueden hacer que la conexión entre los fotones sea un poco más fácil de tragar, como se ha dicho es vago, ¿qué significa realmente decir que dos cosas separadas espacialmente son una sola? Un argumento más preciso es el siguiente. Cuando la relatividad especial dice que nada puede viajar más rápido que la velocidad de la luz, la "nada" se refiere a la materia o energía familiar. Pero el caso que nos ocupa es más sutil, porque no parece que ninguna materia o energía esté viajando entre los dos fotones, y por lo tanto no hay nada cuya velocidad nos lleve a medir. Sin embargo, hay una forma de saber si hemos entrado de cabeza en un conflicto con la relatividad especial. Una característica común a la materia y la energía es que cuando viajan de un lugar a otro pueden transmitir información. Los fotones que viajan de una estación de transmisión a su radio transmiten información. Los electrones que viajan a través de los cables de Internet a su computadora llevan información. Así que, en cualquier situación en la que algo, incluso algo no identificado, se supone que ha viajado más rápido que la velocidad de la luz, una prueba de fuego es preguntar si ha transmitido, o al menos podría haber transmitido, información. Si la respuesta es no, el razonamiento estándar es que nada ha superado la velocidad de la luz, y la relatividad especial permanece sin cuestionar. En la práctica, esta es la prueba que los físicos suelen emplear para determinar si algún proceso sutil ha violado las leyes de la relatividad especial. (Ninguno ha sobrevivido a esta prueba.) Apliquémosla aquí.

¿Hay alguna manera de que, midiendo el giro de los fotones que se mueven a la izquierda y a la derecha sobre algún eje dado, podamos enviar información de uno al otro? La respuesta es no. ¿Por qué? Bueno, la salida que se encuentra en el detector izquierdo o derecho no es más que una secuencia *aleatoria* de resultados en el sentido de las agujas del reloj y en sentido contrario, ya que en cualquier recorrido dado hay una probabilidad igual de que la partícula que se encuentra gire en un sentido o en el otro. De ninguna manera podemos controlar o predecir el resultado de ninguna medición en particular. Por lo tanto, no hay ningún mensaje, no hay ningún código oculto, no hay información alguna en ninguna de estas dos listas aleatorias. Lo único interesante de las dos listas es que son idénticas, pero eso no se puede discernir hasta que las dos listas se unan y se comparen por algún medio convencional, más lento que la luz (fax, correo electrónico, llamada telefónica, etc.). Así pues, el argumento estándar concluye que, aunque la medición del espín de un fotón parece afectar instantáneamente al otro, no se transmite ninguna información de uno al otro, y el límite de velocidad de la relatividad especial sigue vigente. Los físicos dicen que los resultados del espín están correlacionados -ya que las listas son idénticas- pero no se encuentran en una relación tradicional de causa y efecto porque nada viaja entre los dos lugares distantes.

Enredo y Relatividad Especial: El punto de vista contrario

¿Es eso? ¿Se ha resuelto completamente el conflicto potencial entre la no localización de la mecánica cuántica y la relatividad especial? Bueno, probablemente. Sobre la base de las consideraciones anteriores, la mayoría de los físicos lo resumen diciendo que hay una coexistencia armoniosa entre la relatividad especial y los resultados de Aspect sobre las partículas enredadas. En resumen, la relatividad especial sobrevive por la piel de sus dientes. Muchos físicos encuentran esto convincente, pero otros tienen la persistente sensación de que hay algo más en la historia.

A nivel instintivo siempre he compartido la visión de la coexistencia, pero no se puede negar que el tema es delicado. Al final del día, no importa qué palabras holísticas se usen o qué falta de información se resalte, dos partículas ampliamente separadas, cada una de las cuales está gobernada por la aleatoriedad de la mecánica cuántica, de alguna manera se mantienen lo suficientemente "en contacto" para que lo que una hace, la otra también lo hace instantáneamente. Y eso parece sugerir que algún tipo de *algo* más rápido que la luz está operando entre ellas.

¿Dónde estamos? No hay una respuesta firme y universalmente aceptada. Algunos físicos y filósofos han sugerido que el progreso depende de que reconozcamos que el enfoque de la discusión hasta ahora está algo fuera de lugar: el verdadero núcleo de la relatividad especial, señalan con razón, no es tanto que la luz establezca un límite de velocidad, sino que la velocidad de la luz es algo en lo que todos los observadores, independientemente de su propio movimiento, están de acuerdo. [16] De manera más general, estos investigadores enfatizan, el principio central de la relatividad especial es que ningún punto de vista observacional se destaca sobre ningún otro. Así pues, proponen (y muchos están de acuerdo) que si el tratamiento igualitario de todos los observadores de velocidad constante pudiera cuadrar con los resultados experimentales sobre las partículas enmarañadas, se resolvería la tensión con la relatividad especial.[17] Pero lograr este objetivo no es una tarea trivial. Para verlo en concreto, pensemos en cómo la buena mecánica cuántica de los libros de texto explica el experimento de Aspecto.

Según la mecánica cuántica estándar, cuando realizamos una medición y encontramos una partícula aquí, hacemos que su onda de probabilidad cambie: el rango anterior de resultados potenciales se reduce al resultado real que encuentra nuestra medición, como se ilustra en la figura 4.7. Los físicos dicen que la medición hace que la onda de probabilidad se *colapse* y prevén que cuanto mayor sea la onda de probabilidad inicial en algún lugar, mayor será la probabilidad de que la onda se colapse hasta ese punto, es decir, mayor será la probabilidad de que la partícula se encuentre en ese punto. En el enfoque estándar, el colapso ocurre instantáneamente en todo el universo: una vez que se encuentra la partícula aquí, el pensamiento se va, la probabilidad de que se encuentre en *otro*

lugar cae inmediatamente a cero, y esto se refleja en un colapso inmediato de la onda de probabilidad.

En el experimento de Aspecto, cuando se mide el giro del fotón de movimiento izquierdo y se encuentra, digamos, en el sentido de las agujas del reloj alrededor de algún eje, éste colapsa su onda de probabilidad a través de todo el espacio, poniendo instantáneamente la parte en sentido contrario a las agujas del reloj en cero. Dado que este colapso ocurre en todas partes, también ocurre en la ubicación del fotón de movimiento derecho. Y, resulta que esto afecta a la parte en sentido contrario a las agujas del reloj de la onda de probabilidad del fotón de movimiento derecho, causando que también colapse a cero. Por lo tanto, no importa cuán lejos esté el fotón de movimiento derecho del fotón de movimiento izquierdo, su onda de probabilidad es afectada instantáneamente por el cambio en la onda de probabilidad del fotón de movimiento izquierdo, asegurando que tiene el mismo spin que el fotón de movimiento izquierdo a lo largo del eje elegido. Por lo tanto, en la mecánica cuántica estándar, es este cambio instantáneo en las ondas de probabilidad el responsable de la influencia más rápida que la luz.

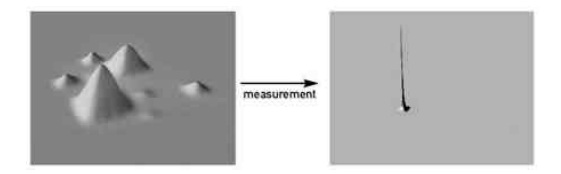


Figura 4.7 Cuando se observa una partícula en algún lugar, la probabilidad de encontrarla en cualquier otro lugar cae a cero, mientras que su probabilidad aumenta al 100 por ciento en el lugar donde se observa.

La matemática de la mecánica cuántica hace que esta discusión cualitativa sea precisa. Y, de hecho, las influencias de largo alcance que surgen del colapso de las ondas de probabilidad cambian la predicción de la frecuencia con la que los detectores izquierdo y derecho de Aspect (cuando sus ejes se eligen de forma aleatoria e independiente) deben encontrar el mismo resultado. Se requiere un cálculo matemático para obtener la respuesta exacta (véase las notas de la sección [18] si está interesado), pero cuando se hace la matemática, se predice que los detectores deben estar de acuerdo *precisamente el 50* por ciento del tiempo (en lugar de predecir el acuerdo más del 50 por ciento del tiempo-el resultado, como hemos visto, se encuentra usando la hipótesis de EPR de un universo *local*). Con una precisión impresionante, *esto es justo lo que Aspect encontró en sus experimentos, un 50 por ciento de acuerdo.* La mecánica cuántica estándar coincide con los datos de manera impresionante.

Esto es un éxito espectacular. Sin embargo, hay un problema. *Después de más de siete décadas, nadie entiende cómo o incluso si el colapso de una onda de probabilidad realmente ocurre.* A lo largo de los años, el *supuesto de* que las

ondas de probabilidad colapsan ha demostrado ser un poderoso vínculo entre las probabilidades que predice la teoría cuántica y los resultados definitivos que revelan los experimentos. Pero es una suposición llena de enigmas. Por un lado, el colapso no surge de las matemáticas de la teoría cuántica; tiene que ser puesto a mano, y no hay una forma acordada o justificada experimentalmente de hacerlo. Por otra parte, ¿cómo es posible que al encontrar un electrón en su detector en la ciudad de Nueva York, se cause que la onda de probabilidad del electrón en la galaxia de Andrómeda caiga a cero instantáneamente? Para estar seguros, una vez que se encuentra la partícula en la ciudad de Nueva York, definitivamente no se encontrará en Andrómeda, pero ¿qué mecanismo desconocido hace que esto sea tan espectacularmente eficiente? ¿Cómo, en un lenguaje más amplio, la parte de la onda de probabilidad en Andrómeda, y en cualquier otro lugar, "sabe" caer a cero simultáneamente?[19]

Retomaremos este*problema de la medición de la mecánica cuántica en el Capítulo* 7 (y como veremos, hay otras propuestas que evitan por completo la idea del colapso de las ondas de probabilidad), pero baste aquí con señalar que, como hemos discutido en el Capítulo 3, algo que es simultáneo desde una perspectiva no es simultáneo desde otra perspectiva en movimiento. (Recordemos que Itchy y Scratchy pusieron sus relojes en un tren en movimiento.) Por lo tanto, si una onda de probabilidad experimentara un colapso simultáneo a través del espacio según un observador, *no experimentará* tal colapso simultáneo según otro que esté en movimiento. De hecho, dependiendo de su movimiento, algunos observadores reportarán que el fotón izquierdo fue medido primero, mientras que otros observadores, igualmente confiables, reportarán que el fotón derecho fue medido primero. Por lo tanto, aunque la idea de las ondas de probabilidad de colapso fuera correcta, no habría una verdad objetiva respecto de qué medición -en el fotón izquierdo o en el derecho- afectó al otro. Así pues, el colapso de las ondas de probabilidad parecería elegir un punto de vista como especial: aquel según el cual el colapso es simultáneo a través del espacio, aquel según el cual las mediciones de la izquierda y la derecha ocurren en el mismo momento. Pero la elección de una perspectiva especial crea una tensión significativa con el núcleo igualitario de la relatividad especial. Se han hecho propuestas para eludir este problema, pero continúa el debate sobre cuáles, si es que hay alguna, son exitosas. [20]

Así, aunque la opinión mayoritaria sostiene que existe una coexistencia armoniosa, algunos físicos y filósofos consideran que la relación exacta entre la mecánica cuántica, las partículas enmarañadas y la relatividad especial es una cuestión abierta. Es ciertamente posible, y en mi opinión probable, que la opinión mayoritaria prevalezca finalmente en alguna forma más definitiva. Pero la historia muestra que los problemas sutiles y fundamentales a veces siembran las semillas de futuras revoluciones. En esta, sólo el tiempo lo dirá.

¿Qué vamos a hacer con todo esto?

El razonamiento de Bell y los experimentos de Aspect muestran que el tipo de universo que Einstein imaginó puede existir en la mente, pero no en la realidad. El de Einstein era un universo en el que lo que haces aquí tiene una relevancia inmediata sólo para las cosas que también están aquí. La física, en su opinión, era puramente local. Pero ahora vemos que los datos descartan este tipo de pensamiento; los datos descartan este tipo de universo.

El de Einstein también fue un universo en el que los objetos poseen valores definidos de todos los atributos físicos posibles. Los atributos no cuelgan en el limbo, esperando que la medición de un experimentador los haga existir. La mayoría de los físicos dirían que Einstein también se equivocó en este punto. Las propiedades de las partículas, según esta opinión mayoritaria, nacen cuando las mediciones las obligan a hacerlo, una idea que examinaremos más adelante en el capítulo 7. Cuando no están siendo observadas o interactuando con el medio ambiente, las propiedades de las partículas tienen una existencia nebulosa y difusa caracterizada únicamente por la probabilidad de que una u otra potencialidad pueda realizarse. El más extremo de los que sostienen esta opinión llegaría a declarar que, en efecto, cuando nadie y ninguna cosa está "mirando" o interactuando con la Luna de ninguna manera, *no está allí.*

En este tema, el jurado sigue fuera. Einstein, Podolsky y Rosen razonaron que la única explicación sensata de cómo las mediciones podían revelar que las partículas ampliamente separadas tenían propiedades idénticas era que las partículas poseían esas propiedades definidas todo el tiempo (y, en virtud de su pasado común, sus propiedades estaban correlacionadas). Décadas más tarde, el análisis de Bell y los datos de Aspect demostraron que esta sugerencia intuitivamente agradable, basada en la premisa de que las partículas siempre tienen propiedades definidas, fracasa como explicación de las correlaciones no locales observadas experimentalmente. Pero el hecho de que no se expliquen los misterios de la no localidad no significa que se descarte la noción de que las partículas siempre tienen propiedades definidas. Los datos descartan un universo local, pero no descartan que las partículas tengan tales propiedades ocultas.

De hecho, en la década de 1950 Bohm construyó su propia versión de la mecánica cuántica que incorpora tanto la no-localidad *como las* variables ocultas. Las partículas, en este enfoque, siempre tienen tanto una posición definida como una velocidad definida, aunque nunca podamos medir ambas simultáneamente. El enfoque de Bohm hizo predicciones que coincidían plenamente con las de la mecánica cuántica convencional, pero su formulación introdujo un elemento aún más descarado de no localidad en el que las *fuerzas* que actúan sobre una partícula en un lugar dependen instantáneamente de las condiciones en lugares distantes. En cierto sentido, entonces, la versión de Bohm sugería cómo se podía avanzar parcialmente hacia el objetivo de Einstein de restaurar algunos de los

rasgos intuitivamente sensibles de la física clásica - partículas con propiedades definidas - que habían sido abandonados por la revolución cuántica, pero también mostraba que hacerlo era el precio de aceptar una no-localidad aún más descarada. Con este alto costo, Einstein habría encontrado poco consuelo en este enfoque.

La necesidad de abandonar la localidad es la lección más asombrosa que surge del trabajo de Einstein, Podolsky, Rosen, Bohm, Bell, y Aspect, así como de muchos otros que jugaron papeles importantes en esta línea de investigación. En virtud de su pasado, los objetos que en la actualidad se encuentran en regiones muy diferentes del universo pueden ser parte de un todo cuántico mecánicamente enredado. Aunque están ampliamente separados, tales objetos se comportan de manera aleatoria pero coordinada.

Solíamos pensar que una propiedad básica del espacio es que separa y distingue un objeto de otro. Pero ahora vemos que la mecánica cuántica desafía radicalmente esta visión. *Dos cosas pueden estar separadas por una enorme cantidad de espacio y sin embargo no tener una existencia totalmente independiente.* Una conexión cuántica puede unirlas, haciendo que las propiedades de cada una dependan de las propiedades de la otra. El espacio no distingue tales objetos enredados. El espacio no puede superar su interconexión. El espacio, incluso una enorme cantidad de espacio, no debilita su interdependencia mecánica cuántica.

Algunas personas han interpretado esto como que "todo está conectado a todo lo demás" o que "la mecánica cuántica nos enreda a todos en un todo universal". Después de todo, el razonamiento es que en el Big Bang todo surgió de un lugar ya que, creemos, todos los lugares que ahora pensamos que son diferentes fueron el mismo lugar desde el principio. Y ya que, como los dos fotones que emergen del mismo átomo de calcio, todo surgió del mismo algo en el principio, todo debería estar mecánicamente cuántico enredado con todo lo demás.

Aunque me gusta el sentimiento, esa charla tan efusiva es floja y exagerada. Las conexiones cuánticas entre los dos fotones que emergen del átomo de calcio están ahí, ciertamente, pero son extremadamente delicadas. Cuando Aspecto y otros llevan a cabo sus experimentos, es crucial que se permita a los fotones viajar sin impedimentos desde su fuente hasta los detectores. Si son empujados por partículas perdidas o chocan con piezas de equipo antes de llegar a uno de los detectores, la conexión cuántica entre los fotones será monumentalmente más difícil de identificar. En lugar de buscar correlaciones en las propiedades de dos fotones, uno tendría que buscar ahora un complejo patrón de correlaciones que involucre a los fotones y todo lo demás con lo que puedan haber chocado. Y a medida que todas estas partículas siguen su camino, chocando y empujando a otras partículas, el entrelazamiento cuántico se extendería tanto a través de estas interacciones con el medio ambiente que se volvería virtualmente imposible de

detectar. A todos los efectos, el entrelazamiento original entre los fotones se habría borrado.

Sin embargo, es verdaderamente sorprendente que estas conexiones existan, y que en condiciones de laboratorio cuidadosamente organizadas puedan ser observadas directamente a distancias significativas. Nos muestran, fundamentalmente, que el espacio no es lo que una vez pensamos que era.

¿Qué pasa con el tiempo?

II - TIEMPO Y EXPERIENCIA

5 - El Río Helado

¿EL TIEMPO FLUYE?

El tiempo es uno de los conceptos más familiares y menos comprendidos que la humanidad ha encontrado. Decimos que vuela, decimos que es dinero, intentamos ahorrarlo, nos molesta cuando lo desperdiciamos. ¿Pero qué es el tiempo? Parafraseando a San Agustín y al Juez Potter Stewart, lo sabemos cuando lo vemos, pero seguramente, en los albores del tercer milenio nuestra comprensión del tiempo debe ser más profunda que eso. En cierto modo, lo es. En otros, no lo es. A través de siglos de desconcierto y reflexión, hemos obtenido una visión de algunos de los misterios del tiempo, pero muchos permanecen. ¿De dónde viene el tiempo? ¿Qué significaría tener un universo sin tiempo? ¿Podría haber más de una dimensión temporal, al igual que hay más de una dimensión espacial? ¿Podemos "viajar" al pasado? Si lo hiciéramos, ¿podríamos cambiar el desarrollo posterior de los acontecimientos? ¿Existe una cantidad absoluta y más pequeña de tiempo? ¿Es el tiempo un ingrediente verdaderamente fundamental en la composición del cosmos, o simplemente una construcción útil para organizar nuestras percepciones, pero que no se encuentra en el léxico con el que están escritas las leyes más fundamentales del universo? ¿Podría ser el tiempo una noción derivada, que surge de algún concepto más básico que aún no se ha descubierto?

Encontrar respuestas completas y plenamente convincentes a estas preguntas es uno de los objetivos más ambiciosos de la ciencia moderna. Sin embargo, las grandes preguntas no son de ninguna manera las únicas. Incluso la experiencia diaria del tiempo se conecta con algunos de los enigmas más espinosos del universo.

Tiempo y experiencia

La relatividad especial y general destrozó la universalidad, la unidad, del tiempo. Estas teorías mostraron que cada uno de nosotros cogemos un fragmento del antiguo tiempo universal de Newton y lo llevamos con nosotros. Se convierte en nuestro propio reloj personal, nuestra propia pista personal que nos arrastra implacablemente de un momento a otro. Nos sorprenden las teorías de la relatividad, el universo, porque mientras que nuestro reloj personal parece

funcionar de manera uniforme, de acuerdo con nuestro sentido intuitivo del tiempo, la comparación con otros relojes revela diferencias. El tiempo para ti no tiene por qué ser el mismo que el tiempo para mí.

Aceptemos esa lección como un hecho. ¿Pero cuál *es* la verdadera naturaleza del tiempo para mí? ¿Cuál es el carácter completo del tiempo tal y como lo experimenta y concibe el individuo, sin centrarse principalmente en comparaciones con las experiencias de otros? ¿Reflejan estas experiencias con precisión la verdadera naturaleza del tiempo? ¿Y qué nos dicen sobre la naturaleza de la realidad?

Nuestras experiencias nos enseñan, de manera abrumadora, que el pasado es diferente del futuro. El futuro parece presentar una riqueza de posibilidades, mientras que el pasado está ligado a una cosa, el hecho de lo que realmente ocurrió. Nos sentimos capaces de influenciar, afectar y moldear el futuro en un grado u otro, mientras que el pasado parece inmutable. Y entre *el pasado* y *el futuro* está el resbaladizo concepto de *ahora,* un punto de sujeción temporal que se reinventa a sí mismo momento a momento, como los fotogramas en una película de cine, ya que pasan por el intenso rayo de luz del proyector y se convierten en el presente momentáneo. El tiempo parece marchar a un ritmo interminable y perfectamente uniforme, alcanzando el fugaz destino del *ahora* con cada golpe del palo del tambor.

Nuestras experiencias también nos enseñan que hay un aparente desequilibrio en la forma en que las cosas se desarrollan en el tiempo. No sirve de nada llorar sobre la leche derramada, porque una vez que se derrama nunca se puede dejar de derramar: nunca vemos que la leche salpicada se reúna, se levante del suelo, y se junte en un vaso que se coloca en posición vertical en la encimera de la cocina. Nuestro mundo parece adherirse perfectamente a una flecha temporal unidireccional, sin desviarse nunca de la estipulación fija de que las cosas pueden empezar *así*y terminar así*,* pero nunca pueden empezar *así*y terminar así*.*

Nuestras experiencias, por lo tanto, nos enseñan dos cosas fundamentales sobre el tiempo. Primero, *el tiempo parece fluir.* Es como si estuviéramos en la orilla del tiempo mientras la poderosa corriente pasa corriendo, barriendo el futuro hacia nosotros, convirtiéndose en el *ahora en* el momento en que nos alcanza, y avanzando apresuradamente mientras retrocede hacia el pasado. O, si eso es demasiado pasivo para su gusto, invierta la metáfora: cabalgamos en el río del tiempo como si se precipitara implacablemente hacia adelante, barriéndonos de uno a otro ahora, mientras el pasado retrocede con el paisaje que pasa y el futuro nos espera para siempre río abajo. (Nuestras experiencias también nos han enseñado que el tiempo puede inspirar algunas de las metáforas más musiques.) En segundo lugar, *el tiempo parece tener una flecha.* El flujo del tiempo parece ir en una dirección y sólo en una dirección, en el sentido de que las cosas suceden en una y sólo una secuencia temporal. Si alguien te da una caja que contiene un

corto de un vaso de leche derramado, pero la película ha sido cortada en sus cuadros individuales, examinando la pila de imágenes puedes volver a montar los cuadros en el orden correcto sin ninguna ayuda o instrucción del cineasta. El tiempo parece tener una dirección intrínseca, apuntando desde lo que llamamos el pasado hacia lo que llamamos el futuro, y las cosas parecen cambiar -derrames de leche, huevos rotos, velas quemadas, gente envejecida- en una alineación universal con esta dirección.

Estas características del tiempo fácilmente perceptibles generan algunos de sus más tentadores rompecabezas. ¿Realmente fluye el tiempo? Si lo hace, ¿qué es lo que realmente fluye? ¿Y a qué velocidad fluye esta cosa del tiempo? ¿Tiene el tiempo realmente una flecha? El espacio, por ejemplo, no parece tener una flecha inherente. Para un astronauta en los oscuros recovecos del cosmos, izquierda y derecha, adelante y atrás, arriba y abajo, todos tendrían el mismo pie. Si hay una flecha del tiempo, ¿es absoluta? ¿O hay cosas que pueden evolucionar en una dirección opuesta a la forma en que la flecha del tiempo parece apuntar?

Construyamos nuestro entendimiento actual pensando primero en estas preguntas en el contexto de la física clásica. Así, para el resto de este y el próximo capítulo (en el que discutiremos el flujo del tiempo y la flecha del tiempo, respectivamente) ignoraremos la probabilidad y la incertidumbre cuánticas. No obstante, gran parte de lo que aprenderemos se traduce directamente al dominio cuántico, y en el capítulo 7 retomaremos la perspectiva cuántica.

¿Fluye el tiempo?

Desde la perspectiva de los seres sensibles, la respuesta parece obvia. Mientras escribo estas palabras, siento claramente *que el* tiempo fluye. Con cada pulsación, cada una de ellas da paso a la siguiente. Al leer estas palabras, sin duda sientes que el tiempo fluye también, mientras tus ojos escudriñan de palabra a palabra a través de la página. Sin embargo, por mucho que lo hayan intentado los físicos, nadie ha encontrado ninguna prueba convincente dentro de las leyes de la física que apoye este sentido intuitivo de que el tiempo fluye. De hecho, un replanteamiento de algunas de las ideas de Einstein sobre la relatividad especial proporciona pruebas de que el tiempo no fluye.

Para entenderlo, volvamos a la descripción del espacio-tiempo presentada en el capítulo 3. Recordemos que las rebanadas que componen la hogaza son los ahora de un observador determinado; cada rebanada representa el espacio en un momento del tiempo desde su perspectiva. La unión que se obtiene al colocar una rebanada junto a otra, en el orden en que el observador las experimenta, llena una región del espacio tiempo. Si llevamos esta perspectiva a un extremo lógico e imaginamos que cada rodaja representa *todo el espacio en un momento* dado del tiempo según el punto de vista de un observador, y si incluimos cada posible

rodaja, desde el pasado antiguo hasta el futuro lejano, el pan abarcará todo el universo a lo largo de todo el tiempo - todo el espacio tiempo. Cada acontecimiento, independientemente de cuándo o dónde, está representado por algún punto del pan.

Esto se ilustra esquemáticamente en la figura 5.1, pero la perspectiva debería hacerte rascar la cabeza. La perspectiva "exterior" de la figura, en la que estamos viendo todo el universo, todo el espacio en cada momento del tiempo, es un punto de vista ficticio, uno que ninguno de nosotros tendrá nunca. Todos estamos *dentro del* espacio-tiempo. Cada experiencia que tú o yo tenemos ocurre en algún lugar del espacio en algún momento del tiempo. Y puesto que la figura 5.1 está pensada para representar todo el espacio-tiempo, abarca la totalidad de tales experiencias: la tuya, la mía y la de todos y todo. Si pudieras hacer un zoom y examinar de cerca todas las idas y venidas en el planeta Tierra, podrías ver a Alejandro Magno teniendo una lección con Aristóteles, Leonardo da Vinci dando la pincelada final en la Mona Lisa, y George Washington cruzando el Delaware; mientras continuabas escaneando la imagen de izquierda a derecha, serías capaz de ver a tu abuela jugando como una niña, a tu padre celebrando su décimo cumpleaños, y tu propio primer día de escuela; mirando aún más a la derecha en la imagen, podrías verte leyendo este libro, el nacimiento de tu tatara-tatara-nieta, y, un poco más adelante, su inauguración como Presidente. Dada la basta resolución de la figura 5.1, no se pueden ver estos momentos, pero se puede ver la historia (esquemática) del sol y del planeta Tierra, desde su nacimiento de una nube de gas coalescente hasta la desaparición de la Tierra cuando el sol se convierte en una gigante roja. Todo está ahí.

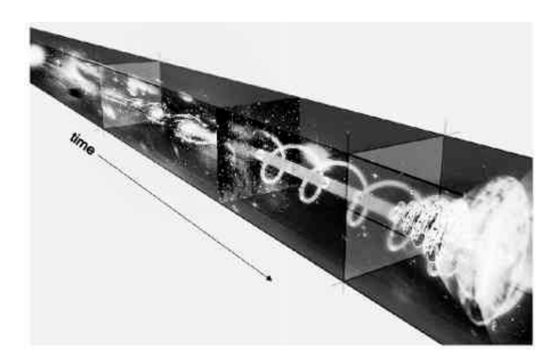


Figura 5.1 Una representación esquemática de todo el espacio a lo largo de todo el tiempo (representando, por supuesto, sólo una parte del espacio a través de una parte del tiempo) que muestra la formación de algunas galaxias tempranas, la formación del sol y la tierra, y la desaparición definitiva de la tierra cuando el sol se convierte en una gigante roja, en lo que ahora consideramos nuestro futuro lejano.

Incuestionablemente, la figura 5.1 es una perspectiva imaginaria. Está fuera del espacio y del tiempo. Es la vista desde la nada y el momento. Incluso así -aunque

no podemos ir más allá de los confines del espacio y el tiempo y abarcar todo el universo- la representación esquemática de la figura 5.1 proporciona un poderoso medio de analizar y aclarar las propiedades básicas del espacio y el tiempo. Como ejemplo principal, el sentido intuitivo del flujo del tiempo puede ser retratado vívidamente en este marco mediante una variación de la metáfora del proyector de películas. Podemos imaginar una luz que ilumina un trozo de tiempo tras otro, haciendo que el trozo cobre vida en el presente -haciéndolo momentáneo *ahora*- sólo para dejar que se oscurezca de nuevo instantáneamente a medida que la luz pasa al siguiente trozo. En este momento, en esta forma intuitiva de pensar sobre el tiempo, la luz está iluminando la porción en la que usted, sentado en el planeta Tierra, está leyendo *esta* palabra, y ahora está iluminando la porción en la que usted está leyendo *esta* palabra. Pero, de nuevo, mientras que esta imagen parece coincidir con la experiencia, los científicos no han podido encontrar nada en las leyes de la física que encarne tal luz en movimiento. No han encontrado ningún mecanismo físico que señale momento tras momento que es momentáneamente real -que es el momento *actual- ya que* el mecanismo fluye siempre hacia el futuro.

Todo lo contrario. Aunque la *perspectiva* de la figura 5.1 es ciertamente imaginaria, hay pruebas convincentes de que el pan de espacio-tiempo -la totalidad del espacio-tiempo, no trozo a trozo- es real. Una implicación menos que ampliamente apreciada de la obra de Einstein es que la realidad relativista especial trata a todos los tiempos por igual. Aunque la noción de *ahora juega* un papel central en nuestra visión del mundo, la relatividad subvierte nuestra intuición una vez más y declara nuestro universo igualitario en el que cada momento es tan real como cualquier otro. Nos topamos con esta idea en el capítulo 3 mientras pensábamos en el cubo giratorio en el contexto de la relatividad especial. Allí, a través de un razonamiento indirecto análogo al de Newton, llegamos a la conclusión de que el espacio tiempo es al menos algo suficiente para proporcionar el punto de referencia para el movimiento acelerado. Aquí retomamos el tema desde otro punto de vista y vamos más allá. Sostenemos que cada parte del pan de espacio tiempo de la figura 5.1 existe en el mismo pie que cualquier otra, sugiriendo, como creía Einstein, que la realidad abarca *por* igual el pasado, el presente y el futuro, y que el flujo que imaginamos que saca a la luz una sección mientras otra se oscurece es ilusorio.

La persistente ilusión del pasado, el presente y el futuro

Para entender la perspectiva de Einstein, necesitamos una definición de trabajo de la realidad, un algoritmo, si se quiere, para determinar qué cosas existen en un momento dado. Aquí hay un enfoque común. Cuando contemplo la realidad, lo que existe en *este* momento, imagino en el ojo de mi mente una especie de instantánea, una imagen mental congelada de todo el universo en este momento.

Mientras escribo estas palabras, mi sentido de lo que existe en este momento*,* mi sentido de la realidad, equivale a una lista de todas esas cosas: el tictac de medianoche en el reloj de mi cocina; mi gato estirado en vuelo entre el suelo y el alféizar de la ventana; el primer rayo de sol matutino que ilumina Dublín; el bullicio en el suelo de la bolsa de Tokio; la fusión de dos átomos de hidrógeno en particular en el sol; la emisión de un fotón de la nebulosa de Orión; el último momento de una estrella moribunda antes de que colapse en un agujero negro - que son, en este momento, en mi imagen mental de marco congelado. Estas son las cosas que están sucediendo ahora mismo*,* así que son las cosas que declaro que existen ahora mismo*.* ¿Carlomagno existe en este momento? No. ¿Existe Nerón en este momento? No. ¿Lincoln existe en este momento? No. ¿Elvis existe en este momento? No. Ninguno de ellos está en mi lista actual. ¿Existe alguien nacido en el año 2300 o 3500 o 57000 ahora mismo? No. De nuevo, ninguno de ellos está en mi imagen de cuadro congelado de la mente, ninguno de ellos está en mi actual porción de tiempo, y por lo tanto, ninguno de ellos está en mi actual lista de ahora. Por lo tanto, digo sin dudarlo que no existen actualmente. Así es como defino la realidad en un momento dado; es un enfoque intuitivo que la mayoría de nosotros usamos, a menudo implícitamente, cuando pensamos en la existencia.

Haré uso de esta concepción a continuación, pero tenga en cuenta un punto delicado. La realidad de la lista actual en esta forma de pensar es una cosa divertida. Nada de lo que ves e*este momento* pertenece a tu lista de ahora, porque toma tiempo para que la luz llegue a tus ojos. Cualquier cosa que veas *ahora mismo* ya ha sucedido. No estás viendo las palabras de esta página como son ahora; en cambio, si sostienes el libro a un pie de tu cara, las estás viendo como eran hace una milmillonésima de segundo. Si miramos a través de una habitación promedio, estamos viendo las cosas como eran hace unas 10 mil millonésimas a 20 mil millonésimas de segundo; si miramos a través del Gran Cañón, estamos viendo el otro lado como era hace una diez milésima de segundo; si miramos a la luna, la estamos viendo como era hace un segundo y medio; para el sol, la vemos como era hace unos ocho minutos; para las estrellas visibles a simple vista, las vemos como eran desde hace unos pocos años hasta hace 10.000 años aproximadamente. Curiosamente, entonces, aunque una imagen mental congelada captura nuestro sentido de la realidad, nuestro sentido intuitivo de "lo que hay ahí fuera", consiste en eventos que no podemos experimentar, o afectar, o incluso registrar ahora mismo. En cambio, una lista de lo que está sucediendo en este momento sólo puede ser compilada después del hecho. Si sabes lo lejos que está algo, puedes determinar cuándo emitió la luz que ves *ahora* y así puedes determinar a cuál de tus partes del tiempo pertenece -en qué lista de ahora ya pasado- debería ser registrado. Sin embargo, y este es el punto principal, ya que usamos esta información para compilar la lista del ahora para cualquier momento dado, actualizándola continuamente a medida que recibimos luz de fuentes cada vez más distantes, las cosas que están listadas son las cosas que intuitivamente creemos que existieron en ese momento.

Sorprendentemente, esta forma de pensar aparentemente sencilla conduce a una concepción inesperadamente expansiva de la realidad. Verán, según el espacio absoluto y el tiempo absoluto de Newton, la imagen congelada del universo de todos en un momento dado contiene exactamente los mismos eventos; el *ahora de todos* es el mismo *ahora,* y por lo tanto la lista de ahora de todos en un momento dado es idéntica. Si alguien o algo está en tu lista de ahora para un momento dado, entonces necesariamente también está en mi lista de ahora para ese momento. La intuición de la mayoría de la gente sigue ligada a esta forma de pensar, pero la relatividad especial cuenta una historia muy diferente. Mira de nuevo la figura 3.4. Dos observadores en movimiento relativo tienen *ahora* - momentos únicos en el tiempo, desde la perspectiva de cada uno - que son diferentes: sus *ahora* cortan el espacio tiempo en diferentes ángulos. Y diferentes *ahora significan* diferentes listas de ahora. *Los observadores en movimient*o relativo tienen diferentes concepciones *de lo que existe en un momento dado, y por lo tanto tienen diferentes concepciones de la realidad.*

A velocidades diarias, el ángulo entre los cortes de ahora de dos observadores es minúsculo; por eso en la vida diaria nunca notamos una discrepancia entre nuestra definición de *ahora* y la de cualquier otro. Por esta razón, la mayoría de los debates sobre la relatividad especial se centran en lo que sucedería si viajáramos a enormes velocidades cercanas a la de la luz, ya que tal movimiento magnificaría enormemente los efectos. Pero hay otra forma de magnificar la distinción entre las concepciones de *ahora de* dos observadores*,* y creo que proporciona un enfoque particularmente esclarecedor de la cuestión de la realidad. Se basa en el siguiente hecho simple: si usted y yo rebanamos un pan ordinario en ángulos ligeramente diferentes, apenas tendrá efecto en los trozos de pan resultantes. Pero si el pan es enorme*,* la conclusión es diferente. Así como una pequeña abertura entre las hojas de un enorme par de tijeras se traduce en una gran separación entre las puntas de las hojas, cortar una enorme barra de pan en ángulos ligeramente diferentes produce rebanadas que se desvían enormemente a distancias muy lejanas de donde se cruzan las rebanadas. Esto se puede ver en la figura 5.2.

Lo mismo es cierto para el espacio tiempo. A velocidades cotidianas, los trozos que representan *ahora* para dos observadores en movimiento relativo se orientarán sólo en ángulos ligeramente diferentes. Si los dos observadores están cerca, esto apenas tendrá efecto. Pero, al igual que en la hogaza de pan, los pequeños ángulos generan grandes separaciones entre las rebanadas cuando se examina su impacto a grandes distancias. Y para las rebanadas del espacio tiempo, una gran desviación entre las rebanadas significa un desacuerdo significativo sobre qué eventos considera cada observador que están ocurriendo ahora. Esto se ilustra en las figuras 5.3 y 5.4, e implica que los individuos que se mueven en relación con los demás, incluso a velocidades ordinarias y cotidianas, tendrán concepciones cada vez más diferentes del *ahora* si están cada vez más separados en el espacio.

Para concretar esto, imagina que Chewie está en un planeta en una galaxia muy, muy lejana, a 10.000 millones de años luz de la Tierra, sentado en su sala de estar. Imagina además que tú (sentado, leyendo estas palabras) y Chewie no se están moviendo uno en relación al otro (para simplificar, ignora el movimiento de los planetas, la expansión del universo, los efectos gravitacionales, etc.). Dado que están en reposo en relación con el otro, usted y Chewie están totalmente de acuerdo en cuestiones de espacio y tiempo: cortarían el espacio tiempo de manera idéntica, y así sus listas de "ahora" coincidirían exactamente. Después de un rato, Chewie se levanta y sale a caminar, una suave y relajante caminata, en una dirección que resulta estar directamente lejos de ti.

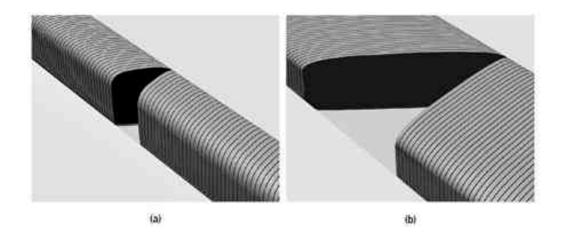


Figura 5.2 a) En un pan ordinario, las rebanadas cortadas en ángulos ligeramente diferentes no se separan de manera significativa. b) Pero cuanto más grande es el pan, para el mismo ángulo, mayor es la separación.

Este cambio en el estado de movimiento de Chewie significa que su concepción del *ahora,* su rebanada del espacio tiempo, rotará ligeramente (ver Figura 5.3). Este pequeño cambio angular no tiene un efecto notable en la vecindad de Chewie: la diferencia entre su nuevo *ahora* y el de cualquiera que siga sentado en su sala de estar es minúscula. Pero a lo largo de la enorme distancia de 10.000 millones de años luz, este diminuto cambio en la noción de *ahora de* Chewie se amplifica (como en el paso de la figura 5.3a a la 5.3b, pero con los protagonistas separados por una enorme distancia, acentuando significativamente el cambio de su *ahora*). *Su ahora y su ahora, que eran uno y el mismo mientras estaba sentado, se separan por su modesto movimiento.*

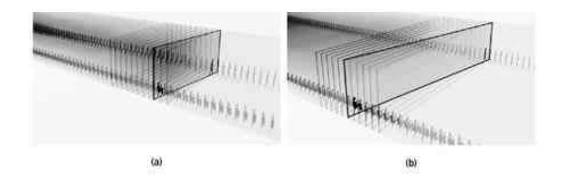


Figura 5.3 a) Dos individuos en reposo en relación con el otro tienen concepciones idénticas del *ahora* y, por lo tanto, idénticos cortes de tiempo. Si un observador se aleja del otro, sus rebanadas de tiempo -lo que cada observador considera *ahora-rotan en relación con el* otro; como se ilustra, la rebanada de *ahora oscurecida* para el observador en movimiento gira hacia el pasado del observador

estacionario. b) Una mayor separación entre los observadores da lugar a una mayor desviación entre los cortes, una mayor desviación en su concepción del *ahora.*

Las figuras 5.3 y 5.4 ilustran la idea clave de forma esquemática, pero utilizando las ecuaciones de la relatividad restringida podemos calcular cuán diferentes son sus ahora. [1] Si Chewie se aleja de ti a unos 16 kilómetros por hora (Chewie tiene un gran paso) los eventos en la Tierra que pertenecen a su nueva lista de ahora son eventos que ocurrieron hace unos 150 años, ¡según tú! Según su concepción del *ahora,* una concepción tan válida como la tuya y que hasta hace un momento coincidía plenamente con la tuya, aún no has nacido. Si se moviera hacia ti a la misma velocidad, el desplazamiento angular sería opuesto, como se ilustra esquemáticamente en la figura 5.4, de modo que su *ahora coincidiría* con lo que llamarías 150 años en el futuro! Ahora, según su ahora*,* puede que ya no seas parte de este mundo. Y si, en lugar de caminar, Chewie se subió al Halcón de*Milenio* viajando a 1.000 millas por hora (menos de la velocidad de un avión Concorde), su *ahora* incluiría eventos en la Tierra que desde tu perspectiva tuvieron lugar hace 15.000 años o 15.000 años en el futuro, dependiendo de si voló hacia ti o hacia ti. Dadas las opciones adecuadas de dirección y velocidad de movimiento, Elvis o Nerón o Carlomagno o Lincoln o alguien nacido en la tierra camino a lo que usted llama el futuro pertenecerá a su nueva lista de ahora.

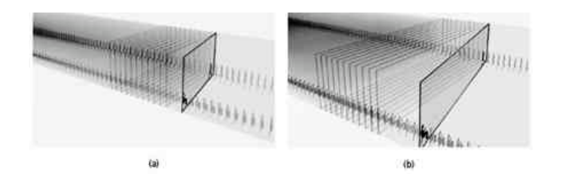


Figura 5.4 a) Igual que la figura 5.3a, excepto que cuando un observador se mueve hacia el otro, su rebanada *ahora gira* hacia el futuro, no el pasado, del otro observador. b) Igual que en la figura 5.3b -una mayor separación produce una mayor desviación en las concepciones *del ahora,* para la misma velocidad relativa- siendo la rotación hacia el futuro en lugar del pasado.

Aunque es sorprendente, nada de esto genera ninguna contradicción o paradoja porque, como explicamos anteriormente, cuanto más lejos está algo, más tiempo tarda en recibir la luz que emite y, por lo tanto, en determinar que pertenece a una determinada lista de ahora. Por ejemplo, aunque John Wilkes Booth se acerque al palco estatal en el Teatro Ford y pertenezca a la nueva lista de ahora de Chewie si se levanta y se aleja de la tierra a unas 9,3 millas por hora, [2] no puede tomar ninguna medida para salvar al Presidente Lincoln. A una distancia tan enorme, se necesita una enorme cantidad de tiempo para recibir e intercambiar mensajes, por lo que sólo los descendientes de Chewie, miles de millones de años después, recibirán realmente la luz de esa fatídica noche en Washington. El punto, sin embargo, es que cuando sus descendientes usen esta información para actualizar

la vasta colección de listas de "ahora" pasadas, encontrarán que el asesinato de Lincoln pertenece a la misma lista de "ahora" que contiene a Chewie levantándose y alejándose de la Tierra. Y sin embargo, también encontrarán que un momento antes de que Chewie se levantara, su lista de "ahora" contenía, entre muchas otras cosas, a usted, en el siglo XXI, sentado y leyendo estas palabras. [3]

Del mismo modo, hay cosas sobre nuestro futuro, como quién ganará la elección presidencial de los Estados Unidos en el año 2100, que parecen completamente abiertas: lo más probable es que los candidatos para esa elección ni siquiera hayan nacido, y mucho menos que hayan decidido presentarse a las elecciones. Pero si Chewie se levanta de su silla y camina hacia la tierra a unas 6,4 millas por hora, su ahora - su concepción de lo que existe, su concepción de lo que ha sucedido - incluirá la selección del primer presidente del siglo veintidós. Algo que nos parece completamente indeciso es algo que, para él, ya ha sucedido. Una vez más, Chewie no sabrá el resultado de la elección hasta dentro de miles de millones de años, ya que es el tiempo que tardarán nuestras señales de televisión en llegar a él. Pero cuando la noticia de los resultados de la elección llegue a los descendientes de Chewie y ellos la usen para actualizar el libro de historia de Chewie, su colección de listas de "ahora" pasadas, encontrarán que los resultados de la elección pertenecen a la misma lista de "ahora" en la que Chewie se levantó y comenzó a caminar hacia la tierra - una lista de "ahora", anotan los descendientes de Chewie, que ocurre justo un momento después de una que le contiene, en los primeros años del siglo XXI de la tierra, terminando este párrafo.

Este ejemplo destaca dos puntos importantes. En primer lugar, aunque estamos acostumbrados a la idea de que los efectos relativistas se hacen evidentes a velocidades cercanas a la de la luz, incluso a bajas velocidades los efectos relativistas pueden ser muy amplificados cuando se consideran a grandes distancias en el espacio. En segundo lugar, el ejemplo da una idea de la cuestión de si el espaciotiempo (el pan) es realmente una entidad o sólo un concepto abstracto, una unión abstracta del espacio en *este momento* junto con su historia y su supuesto futuro.

Verán, la concepción de Chewie de la realidad, su imagen mental congelada, su concepción de lo que existe *ahora,* es tan real para él como nuestra concepción de la realidad lo es para nosotros. Así que, al evaluar lo que constituye la realidad, sería sorprendentemente estrecho de miras si no incluyéramos también su perspectiva. Para Newton, un enfoque tan igualitario no supondría la más mínima diferencia, porque, en un universo con espacio y tiempo absolutos, el trozo de ahora de cada uno coincide. Pero en un universo relativista, nuestro universo, hace una gran diferencia. Mientras que nuestra concepción familiar de lo que existe en este momento equivale a un solo trozo de ahora, normalmente vemos el pasado como pasado y el futuro como aún por venir, debemos aumentar esta imagen con el trozo de ahora de Chewie, un trozo de ahora que, como reveló la discusión, puede diferir sustancialmente del nuestro. Además, como la ubicación

inicial de Chewie y la velocidad con la que se mueve son arbitrarias, debemos incluir los cortes de ahora asociados con todas las posibilidades. Estos cortes de ahora, como en nuestra discusión anterior, se centrarían en la ubicación inicial de Chewie - o de algún otro observador real o hipotético - en el espacio y se rotarían en un ángulo que depende de la velocidad elegida. (La única restricción proviene del límite de velocidad establecido por la luz y, como se explica en las notas, en la representación gráfica que estamos usando esto se traduce en un límite del ángulo de rotación de 45 grados, ya sea en el sentido de las agujas del reloj o en el sentido contrario). Como pueden ver, en la figura 5.5, la colección de todos estos cortes de ahora rellena una región sustancial del pan del espacio tiempo. De hecho, si el espacio es infinito -si los cortes de ahora se extienden infinitamente lejos- entonces los cortes de ahora rotados pueden centrarse arbitrariamente lejos, y por lo tanto su unión se extiende a través de *cada* punto del pan del espacio tiempo. [9]

Así que: *si compras la noción de que la realidad consiste en las cosas en tu imagen mental de marco congelado en este momento, y si estás de acuerdo en que tu* ahora *no es más válido que el* ahora *de alguien ubicado muy lejos en el espacio que puede moverse libremente, entonces la realidad abarca todos los eventos en el espacio tiempo.* El pan total existe. Así como visualizamos todo el espacio como *realmente* estando ahí fuera, como *realmente* existiendo, también deberíamos visualizar todo el tiempo como *realmente* estando ahí fuera, como *realmente existiendo*, también. El pasado, el presente y el futuro parecen ser entidades distintas. Pero, como Einstein dijo una vez, "Para nosotros los físicos convencidos, la distinción entre pasado, presente y futuro es sólo una ilusión, aunque persista".[5] La única cosa que es real es todo el espacio tiempo.

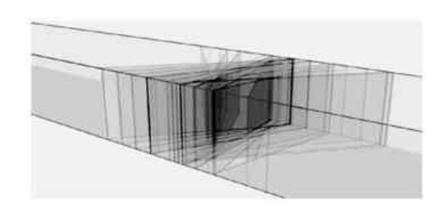


Figura 5.5 Una muestra de cortes actuales para una variedad de observadores (reales o hipotéticos) situados a diversas distancias de la Tierra, que se mueven con diversas velocidades.

La experiencia y el flujo del tiempo

En esta forma de pensar, los eventos, independientemente de cuando suceden desde cualquier perspectiva en particular, simplemente *son.* Todos ellos existen. Ocupan eternamente su punto particular en el espacio tiempo. No hay flujo. Si te lo pasaste muy bien al filo de la medianoche de la víspera de Año Nuevo de 1999,

aún lo estás, ya que es sólo un punto inmutable en el espacio tiempo. Es difícil aceptar esta descripción, ya que nuestra visión del mundo distingue con tanta fuerza entre el pasado, el presente y el futuro. Pero si miramos fijamente a este esquema temporal familiar y lo enfrentamos con los fríos y duros hechos de la física moderna, su único lugar de refugio parece estar dentro de la mente humana.

Es innegable que nuestra experiencia consciente parece barrer a través de las rebanadas. Es como si nuestra mente proporcionara la luz del proyector a la que nos referimos antes, de modo que los momentos de tiempo cobran vida cuando son iluminados por el poder de la conciencia. La sensación que fluye de un momento a otro surge de nuestro reconocimiento consciente del cambio en nuestros pensamientos, sentimientos y percepciones. Y la secuencia de cambio parece tener un movimiento continuo; parece desarrollarse en una historia coherente. Pero, sin ninguna pretensión de precisión psicológica o neurobiológica, podemos imaginar cómo podríamos experimentar un flujo de tiempo aunque, en realidad, puede que no exista tal cosa. Para ver lo que quiero decir, imagínese jugando a *Lo que el viento se llevó, a* través de un reproductor de DVD defectuoso que salta aleatoriamente hacia adelante y hacia atrás: un fotograma fijo parpadea momentáneamente en la pantalla y es seguido inmediatamente por otro de una parte completamente diferente de la película. Cuando veas esta versión desordenada, te será difícil entender lo que está pasando. Pero Scarlett y Rhett no tienen ningún problema. En cada fotograma, hacen lo que siempre han hecho en ese fotograma. Si pudieras detener el DVD en algún fotograma en particular y preguntarles sobre sus pensamientos y recuerdos, responderían con las mismas respuestas que habrían dado si hubieras reproducido el DVD en un reproductor que funcionara correctamente. Si les preguntabas si era confuso jugar a la Guerra Civil fuera de orden, te miraban con curiosidad y pensaban que habías tirado demasiados julepes de menta. En cualquier marco, tendrían los pensamientos y recuerdos que siempre han tenido en ese marco y, en particular, esos pensamientos y recuerdos les darían la sensación de que el tiempo fluye suavemente y coherentemente hacia adelante, como de costumbre.

Del mismo modo, cada momento en el espacio tiempo, cada parte del tiempo, es como uno de los fotogramas de una película. Existe independientemente de si alguna luz lo ilumina o no. En cuanto a Scarlett y Rhett, para el que está en un momento así, *es* el *ahora, es* el momento que experimenta en *ese* momento. Y siempre lo será. Además, dentro de cada rebanada individual, tus pensamientos y recuerdos son lo suficientemente ricos para dar una sensación de que el tiempo ha fluido continuamente a ese momento. Esta sensación, esta sensación de que el tiempo está fluyendo, no requiere que los momentos previos - marcos anteriores - sean "iluminados secuencialmente".[6]

Y si lo piensas un momento más, te darás cuenta de que es algo muy bueno, porque la noción de que la luz de un proyector trae secuencialmente momentos a la vida es altamente problemática por otra razón aún más básica. Si la luz del

proyector hiciera bien su trabajo e iluminara un momento dado, digamos, el golpe de medianoche, la víspera de Año Nuevo de 1999, ¿qué significaría para ese momento oscurecer? Si el momento estuviera iluminado, entonces ser iluminado sería una característica del momento, una característica tan eterna e inalterable como todo lo que sucede en ese momento. Experimentar la iluminación -estar "vivo", ser el presente, ser *el ahora -y experimentar la oscuridad en ese momento-, estar* "dormido", ser el pasado, ser lo que fue- es experimentar el cambio. *Pero el concepto de cambio no tiene sentido con respecto a un solo momento en el tiempo.* El cambio tendría que ocurrir a través del tiempo, el cambio marcaría el paso del tiempo, pero ¿qué noción del tiempo podría ser esa? Por definición, los momentos *no* incluyen el paso del tiempo -al menos, no el tiempo del que somos conscientes- porque los momentos simplemente son, son la materia prima del tiempo, *no*cambian. Un momento particular no puede cambiar en el tiempo más de lo que un lugar particular puede moverse en el espacio: si el lugar se moviera, sería un lugar diferente en el espacio; si un momento en el tiempo cambiara, sería un momento diferente en el tiempo. La imagen intuitiva de un proyector de luz que da vida a cada nuevo *ahora no resiste un* examen cuidadoso. En su lugar, cada momento se ilumina, y cada momento permanece iluminado. Cada momento *es.* Bajo un atento escrutinio, el río que fluye en el tiempo se parece más a un bloque de hielo gigante con cada momento congelado para siempre en su lugar. [7]

Esta concepción del tiempo es significativamente diferente de la que la mayoría de nosotros hemos interiorizado. A pesar de que surgió de sus propias percepciones, Einstein no se endureció ante la dificultad de absorber completamente un cambio de perspectiva tan profundo. Rudolf Carnap [8] cuenta una maravillosa conversación que tuvo con Einstein sobre este tema: "Einstein dijo que el problema del ahora le preocupaba seriamente. Explicó que la experiencia del ahora significa algo especial para el hombre, algo esencialmente diferente del pasado y del futuro, pero que esta importante diferencia no ocurre ni puede ocurrir dentro de la física. Que esta experiencia no pueda ser comprendida por la ciencia le pareció una cuestión de dolorosa pero inevitable resignación".

Esta renuncia deja abierta una cuestión fundamental: ¿Es la ciencia incapaz de captar una cualidad fundamental del tiempo que la mente humana abraza tan fácilmente como los pulmones toman el aire, o la mente humana impone al tiempo una cualidad propia, una que es artificial y que por lo tanto no aparece en las leyes de la física?

Si me hicieras esta pregunta durante el día de trabajo, me pondría de lado de la última perspectiva, pero al anochecer, cuando el pensamiento crítico se suaviza en las rutinas ordinarias de la vida, es difícil mantener una resistencia total al primer punto de vista. El tiempo es un tema sutil y estamos lejos de comprenderlo plenamente. Es posible que alguna persona perspicaz conciba algún día una nueva forma de ver el tiempo y revele un fundamento físico auténtico para un tiempo que fluye. Por otra parte, la discusión anterior, basada en la lógica y la relatividad, puede resultar ser la historia completa. Ciertamente, sin embargo, la sensación de que el tiempo fluye está profundamente arraigada en nuestra experiencia y penetra profundamente en nuestro pensamiento y lenguaje. Tanto es así, que hemos dejado y seguiremos dejando de lado las descripciones coloquiales habituales que se refieren a un tiempo fluido. Pero no confundan el lenguaje con la realidad. El lenguaje humano es mucho mejor para capturar la experiencia humana que para expresar leyes físicas profundas.

6 - El azar y la flecha

¿EL TIEMPO TIENE UNA DIRECCIÓN?

Incluso si el tiempo no fluye, sigue teniendo sentido preguntarse si tiene una flecha - si hay una dirección para la forma en que las cosas se desarrollan en el tiempo que pueda ser discernida en las leyes de la física. Es la cuestión de si hay algún orden intrínseco en la forma en que los eventos se esparcen a lo largo del espacio tiempo y si hay una diferencia científica esencial entre un orden de eventos y el orden inverso. Como todo el mundo ya sabe, ciertamente parece haber una gran distinción de este tipo; es lo que da promesa de vida y hace que la experiencia sea conmovedora. Sin embargo, como veremos, explicar la distinción entre el pasado y el futuro es más difícil de lo que se piensa. De manera bastante notable, la respuesta que vamos a dar está íntimamente ligada a las condiciones precisas del origen del universo.

El rompecabezas

Mil veces al día, nuestras experiencias revelan una distinción entre las cosas que se desarrollan de una manera en el tiempo y la inversa. Una pizza bien caliente se enfría en el camino desde Domino's, pero nunca encontramos una pizza que llegue más caliente que cuando fue sacada del horno. La crema mezclada con el café forma un líquido uniformemente bronceado, pero nunca vemos una taza de café ligero sin remover y separada en crema blanca y café negro. Los huevos caen, agrietándose y salpicando, pero nunca vemos huevos salpicados y las cáscaras de huevo se juntan y se unen en huevos no agrietados. El gas de dióxido

de carbono comprimido en una botella de Coca-Cola se precipita hacia afuera cuando giramos la tapa, pero nunca encontramos el gas de dióxido de carbono esparcido juntándose y volviendo a la botella. Los cubos de hielo puestos en un vaso de agua a temperatura ambiente se derriten, pero nunca vemos glóbulos en un vaso de agua a temperatura ambiente que se fusionan en cubos de hielo sólidos. Estas secuencias comunes de eventos, así como otras innumerables, ocurren en un solo orden temporal. Nunca ocurren al revés, y por lo tanto proporcionan una noción de antes y después, nos dan una concepción consistente y aparentemente universal del pasado y el futuro. Estas observaciones nos convencen de que si examináramos todo el espacio tiempo desde el exterior (como en la figura 5.1), veríamos una asimetría significativa a lo largo del eje temporal. Los huevos salpicados de todo el mundo se encontrarían a un lado -el lado que convencionalmente llamamos el futuro- de sus homólogos enteros y no salpicados.

Tal vez el ejemplo más señalado de todos es que nuestras mentes parecen tener acceso a una colección de eventos que llamamos el pasado -nuestros recuerdos- pero ninguno de nosotros parece ser capaz de recordar la colección de eventos que llamamos el futuro. Así que parece obvio que hay una gran diferencia entre el pasado y el futuro. Parece haber una orientación manifiesta de cómo una enorme variedad de cosas se desarrollan en el tiempo. Parece haber una distinción manifiesta entre las cosas que podemos recordar (el pasado) y las que no podemos (el futuro). Esto es lo que queremos decir con que el tiempo tiene una orientación, una dirección o una flecha.[1]

La física, y la ciencia en general, se basa en las regularidades. Los científicos estudian la naturaleza, encuentran patrones y los codifican en leyes naturales. Se podría pensar, por lo tanto, que la enorme riqueza de regularidad que nos lleva a percibir una aparente flecha del tiempo sería la evidencia de una ley fundamental de la naturaleza. Una forma tonta de formular tal ley sería introducir la Ley de la Leche Derramada, estableciendo que los vasos de leche se derraman pero no se desparraman, o la Ley de los Huevos Salpicados, estableciendo que los huevos se rompen y salpican pero nunca se desparraman y se rompen. Pero ese tipo de ley no nos compra nada: es meramente descriptiva, y no ofrece ninguna explicación más allá de una simple observación de lo que sucede. Sin embargo, esperamos que en algún lugar de las profundidades de la física haya una ley menos tonta que describa el movimiento y las propiedades de las partículas que componen la pizza, la leche, los huevos, el café, las personas y las estrellas -los ingredientes fundamentales de todo- que muestre por qué las cosas evolucionan a través de una secuencia de pasos pero nunca al revés. Tal ley daría una explicación fundamental a la flecha observada del tiempo.

Lo más sorprendente es que nadie ha descubierto ninguna ley de este tipo. Es más, las leyes de la física que han sido articuladas desde Newton a través de Maxwell y Einstein, y hasta hoy, muestran una *completa simetría entre el pasado y*

el futuro. [10] En ninguna de estas leyes encontramos una estipulación de que se apliquen en un sentido en el tiempo pero no en el otro. En ninguna parte hay distinción alguna entre cómo se ven o se comportan las leyes cuando se aplican en cualquier dirección en el tiempo. Las leyes tratan lo que llamamos pasado y futuro en un pie de igualdad. Aunque la experiencia revela una y otra vez que hay una flecha de cómo los eventos se desarrollan en el tiempo, esta flecha parece no encontrarse en las leyes fundamentales de la física.

Pasado, futuro y las leyes fundamentales de la física

¿Cómo puede ser esto? ¿Las leyes de la física no proporcionan ningún fundamento que distinga el pasado del futuro? ¿Cómo puede no haber una ley de la física que explique que los eventos se desarrollan en *este* orden pero nunca al revés?

La situación es aún más desconcertante. Las leyes conocidas de la física declaran, en realidad, contrariamente a nuestras experiencias de toda la vida, que el café ligero puede separarse en café negro y crema blanca; una yema salpicada y una colección de trozos de cáscara aplastados pueden juntarse y formar un huevo intacto perfectamente liso; el hielo derretido en un vaso de agua a temperatura ambiente puede volver a fusionarse en cubos de hielo; el gas liberado al abrir el refresco puede volver a la botella. Todas las leyes físicas que apreciamos apoyan plenamente lo que se conoce como *simetría de tiempo inverso.* Esta es la afirmación de que si alguna secuencia de eventos puede desarrollarse en un orden temporal (la crema y la mezcla de café, los huevos se rompen, el gas se precipita hacia afuera) entonces estos eventos también pueden desarrollarse en forma inversa (la crema y el café se desmezclan, los huevos se rompen, el gas se precipita hacia adentro). Me explayaré sobre esto en breve, pero el resumen de una frase es que no sólo las leyes conocidas no nos dicen por qué vemos que los eventos se desarrollan en un solo orden, sino que también nos dicen que, en teoría, los eventos pueden desarrollarse en orden inverso. [11]

La pregunta candente es *¿Por qué nunca vemos esas cosas?* Creo que es una apuesta segura que nadie ha visto nunca un huevo salpicado sin salpicar. Pero si las leyes de la física lo permiten, y si, además, esas leyes tratan el salpicón y el desparramo por igual, ¿por qué nunca ocurre uno mientras el otro lo hace?

Simetría de tiempo invertido

Como primer paso hacia la resolución de este rompecabezas, necesitamos entender en términos más concretos lo que significa que las leyes conocidas de la física sean simétricas en el tiempo. Para ello, imagina que estamos en el siglo XX

y que estás jugando al tenis en la nueva liga interplanetaria con tu compañero, Coolstroke Williams. Algo desacostumbrado a la gravedad reducida de Venus, Coolstroke golpea un gigantesco revés que lanza la pelota a la profunda y aislada oscuridad del espacio. Un transbordador espacial que pasa filma la pelota a medida que pasa y envía las imágenes a la CNN (Celestial News Network) para su difusión. Esta es la pregunta: Si los técnicos de la CNN cometieran un error y pasaran la película de la pelota de tenis al revés, ¿habría alguna manera de saberlo? Bueno, si conocieras el rumbo y la orientación de la cámara durante la filmación podrías reconocer su error. Pero, ¿podrías averiguarlo sólo mirando la propia filmación, sin información adicional? La respuesta es no. Si en la dirección de tiempo correcta (hacia adelante) el metraje mostrara la pelota flotando de izquierda a derecha, entonces al revés mostraría la pelota flotando de derecha a izquierda. Y ciertamente, las leyes de la física clásica permiten que las pelotas de tenis se muevan tanto a la izquierda como a la derecha. Así que el movimiento que se ve cuando la película se ejecuta en la dirección del tiempo hacia adelante o hacia atrás es perfectamente coherente con las leyes de la física.

Hasta ahora hemos imaginado que ninguna fuerza actuaba sobre la pelota de tenis, por lo que se movía a velocidad constante. Consideremos ahora la situación más general incluyendo las fuerzas. Según Newton, el efecto de una fuerza es cambiar la velocidad de un objeto: las fuerzas imparten aceleraciones. Imaginemos, entonces, que después de flotar un rato por el espacio, la bola es capturada por la atracción gravitatoria de Júpiter, causando que se mueva con mayor velocidad en un arco descendente hacia la derecha hacia la superficie de Júpiter, como en las figuras 6.1a y 6.1b. Si se reproduce una película de este movimiento en reversa, la pelota de tenis parecerá moverse en un arco que barre hacia arriba y hacia la izquierda, alejándose de Júpiter, como en la figura 6.1c. Aquí está la nueva pregunta: ¿el movimiento representado por la película cuando se reproduce al revés -el movimiento de inversión de tiempo de lo que realmente se filmó- está permitido por las leyes clásicas de la física? ¿Es el movimiento lo que podría ocurrir en el mundo real? Al principio, la respuesta parece ser obviamente afirmativa: las pelotas de tenis pueden moverse en arcos descendentes hacia la derecha o ascendentes hacia la izquierda, o, para el caso, en innumerables otras trayectorias. Entonces, ¿cuál es la dificultad? Bueno, aunque la respuesta es efectivamente sí, este razonamiento es demasiado simplista y pierde la verdadera intención de la pregunta.

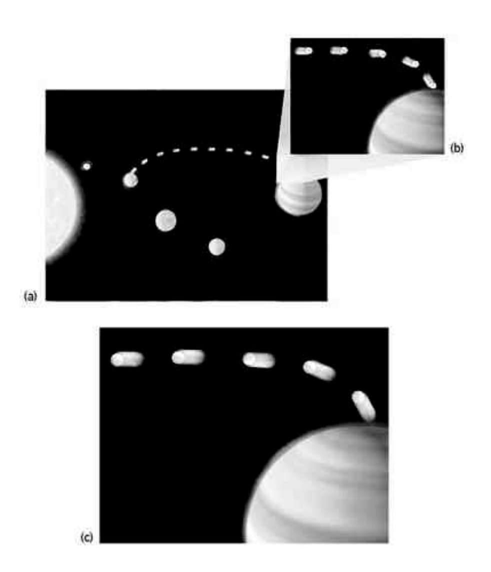


Figura 6.1 (a) Una pelota de tenis volando de Venus a Júpiter junto con (b) un primer plano. (c) El movimiento de la pelota de tenis si su velocidad se invierte justo antes de que golpee a Júpiter.

Cuando se ejecuta la película en reversa, se ve la pelota de tenis saltar desde la superficie de Júpiter, moviéndose hacia arriba y hacia la izquierda, con exactamente la misma velocidad (pero en dirección opuesta) desde que golpeó el planeta. Esta parte inicial de la película es ciertamente consistente con las leyes de la física: podemos imaginar, por ejemplo, a alguien lanzando la pelota de tenis desde la superficie de Júpiter con precisamente esta velocidad. La pregunta esencial es si el *resto* de la marcha atrás también es consistente con las leyes de la física. ¿Una pelota lanzada con esta velocidad inicial, y sujeta a la gravedad de Júpiter que tira hacia abajo, se movería realmente a lo largo de la trayectoria descrita en el resto de la película de la carrera inversa? ¿Retrocedería exactamente su trayectoria descendente original, pero en reversa?

La respuesta a esta pregunta más refinada *es* sí. Para evitar cualquier confusión, vamos a explicar esto. En la figura 6.1a, antes de que la gravedad de Júpiter tuviera un efecto significativo, la bola se dirigía puramente a la derecha. Luego, en la Figura 6.1b, la poderosa fuerza gravitatoria de Júpiter atrapó la bola y la arrastró hacia el centro del planeta, un arrastre que es mayormente hacia abajo pero, como puede ver en la figura, también es parcialmente hacia la derecha. Esto significa que al acercarse la bola a la superficie de Júpiter, su velocidad hacia la derecha se incrementó un poco, pero su velocidad hacia abajo se incrementó dramáticamente. Por lo tanto, en la película de marcha atrás, el lanzamiento de la pelota desde la superficie de Júpiter se dirigiría algo *hacia la izquierda* pero predominantemente hacia arriba, como en la figura 6.1c. Con esta velocidad inicial, la gravedad de Júpiter habría tenido su mayor impacto en la velocidad ascendente del balón, causando que fuera cada vez más lento, mientras que también disminuía la velocidad hacia la izquierda del balón, pero de forma menos

dramática. Y con la velocidad ascendente de la bola disminuyendo rápidamente, su movimiento estaría dominado por su velocidad en dirección a la izquierda, causando que siga una trayectoria ascendente hacia la izquierda. Cerca del final de este arco, la gravedad habría minado todo el movimiento ascendente así como la velocidad adicional hacia la derecha que la gravedad de Júpiter impartió a la bola en su camino hacia abajo, dejando a la bola moviéndose puramente hacia la izquierda con exactamente la misma velocidad que tenía en su aproximación inicial.

Todo esto puede hacerse cuantitativo, pero el punto a notar es que esta trayectoria es exactamente la inversa del movimiento original de la pelota. Simplemente invirtiendo la velocidad de la pelota, como en la figura 6.1c, al ponerla en marcha con la misma velocidad pero en dirección opuesta, se puede hacer que vuelva completamente a su trayectoria original, pero al revés. Volviendo a la discusión sobre la película, vemos que la trayectoria ascendente hacia la izquierda, la que acabamos de calcular con un razonamiento basado en las leyes de movimiento de Newton, es exactamente lo que veríamos al invertir la película. Así que el movimiento inverso de la bola, como se muestra en la película de marcha atrás, se ajusta a las leyes de la física con la misma seguridad que su movimiento hacia adelante. El movimiento que veríamos al pasar la película en reversa es un movimiento que *realmente* podría ocurrir en el mundo real.

Aunque hay algunas sutilezas que he relegado a las notas finales, esta conclusión es general. [2] Todas las leyes conocidas y aceptadas relacionadas con el movimiento -desde la mecánica de Newton que acabamos de discutir, pasando por la teoría electromagnética de Maxwell, hasta las teorías especiales y generales de la relatividad de Einstein (recuerde que estamos posponiendo la mecánica cuántica hasta el próximo capítulo)- incorporan la simetría de tiempo inverso: el movimiento que puede ocurrir en la dirección habitual de tiempo-avance puede igualmente ocurrir en reversa. Como la terminología puede ser un poco confusa, permítanme volver a recalcar que no estamos invirtiendo el tiempo. El tiempo está haciendo lo que siempre hace. En cambio, nuestra conclusión es que *podemos hacer que un objeto trace su trayectoria en reversa por el simple procedimiento de invertir su velocidad en cualquier punto de su trayectoria.* Equivalentemente, el mismo procedimiento, invertir la velocidad del objeto en algún punto de su trayectoria, haría que el objeto ejecutara el movimiento que veríamos en una película al revés.

y huevos salpicados

Ver una pelota de tenis disparada entre Venus y Júpiter en cualquier dirección no es particularmente interesante. Pero como la conclusión a la que hemos llegado es ampliamente aplicable, vayamos ahora a un lugar más emocionante: su cocina.

Coloca un huevo en la encimera de tu cocina, ruédalo hacia el borde, y déjalo caer al suelo y salpicar. Para estar seguros, hay mucho movimiento en esta secuencia de eventos. El huevo cae. La cáscara se rompe. La yema salpica de esta forma y de otra. Las tablas del suelo vibran. Se forman remolinos en el aire circundante. La fricción genera calor, causando que los átomos y moléculas del huevo, el suelo y el aire se muevan un poco más rápido. Pero así como las leyes de la física nos muestran cómo podemos hacer que la pelota de tenis trace su camino preciso en reversa, las mismas leyes muestran cómo podemos hacer que cada pedazo de cáscara de huevo, cada gota de yema, cada sección del suelo, y cada bolsa de aire trace exactamente su movimiento en reversa, también. "Todo" lo que necesitamos hacer es invertir la velocidad de cada uno de los componentes de la salpicadura. Más precisamente, el razonamiento utilizado con la pelota de tenis implica que si, hipotéticamente, fuéramos capaces de invertir simultáneamente la velocidad de *cada átomo* y molécula involucrada directa o indirectamente con el huevo salpicado, *todo* el movimiento de salpicadura procedería en reversa.

De nuevo, al igual que con la pelota de tenis, si lográramos invertir todas estas velocidades, lo que veríamos se vería como una película en reversa. Pero, a diferencia de la pelota de tenis, la inversión de movimiento del salpicadero sería extremadamente impresionante. Una ola de moléculas de aire y pequeñas vibraciones del suelo convergerían en el lugar de la colisión desde todas las partes de la cocina, causando que cada trozo de cáscara y cada gota de yema se dirigiera hacia el lugar del impacto. Cada ingrediente se movería exactamente con la misma velocidad que tenía en el proceso de salpicadura original, pero cada uno se movería ahora en la dirección opuesta. Las gotas de yema volarían de vuelta a un glóbulo justo cuando decenas de pequeños trozos de cáscara llegaron a las afueras, perfectamente alineados para fusionarse en un contenedor ovoide liso. Las vibraciones del aire y del suelo conspirarían precisamente con el movimiento de la miríada de gotas de yema y trozos de cáscara para dar al huevo recién formado la patada adecuada para saltar del suelo en una sola pieza, levantarse hasta el mostrador de la cocina y aterrizar suavemente en el borde con un movimiento de rotación suficiente para rodar unos centímetros y descansar con gracia. Esto *es* lo que pasaría si pudiéramos realizar la tarea de inversión total y exacta de la velocidad de todo lo que está involucrado. [3]

Por lo tanto, tanto si un evento es simple, como un arco de pelota de tenis, o algo más complejo, como un huevo salpicando, las leyes de la física muestran que lo que sucede en una dirección temporal puede, al menos en principio, también suceder a la inversa.

Principio y práctica

Las historias de la pelota de tenis y el huevo hacen más que ilustrar la simetría temporal de las leyes de la naturaleza. También sugieren por qué, en el mundo real de la experiencia, vemos que muchas cosas suceden de una manera pero nunca al revés. Conseguir que la pelota de tenis volviera a su camino no fue tan difícil. La agarramos y la enviamos con la misma velocidad pero en la dirección opuesta. Eso es todo. Pero conseguir que todos los caóticos detritus del huevo sigan su camino sería monumentalmente más difícil. Necesitaríamos agarrar cada salpicadura, y simultáneamente enviarla a la misma velocidad pero en la dirección opuesta. Claramente, eso está más allá de lo que nosotros (o incluso todos los caballos del Rey y todos los hombres del Rey) podemos hacer realmente.

¿Hemos encontrado la respuesta que buscábamos? ¿Es la razón por la que los huevos salpican pero no desparraman, aunque ambas acciones están permitidas por las leyes de la física, una cuestión de lo que es y no es práctico? ¿Es la respuesta simplemente que es fácil hacer que un huevo se salpique, rodar de un mostrador, pero es extraordinariamente difícil hacer que se desparrame?

Bueno, si fuera la respuesta, créeme, no lo habría convertido en algo tan importante. El tema de la facilidad versus la dificultad *es* una parte esencial de la respuesta, pero la historia completa dentro de la cual encaja es mucho más sutil y sorprendente. Llegaremos a eso a su debido tiempo, pero primero debemos hacer la discusión de esta sección un poco más precisa. Y eso nos lleva al concepto de entropía.

Entropía

Grabada en una lápida en el Zentralfriedhof de Viena, cerca de las tumbas de Beethoven, Brahms, Schubert y Strauss, hay una única ecuación, S = k log W, que expresa la formulación matemática de un poderoso concepto conocido como *entropía.* La lápida lleva el nombre de Ludwig Boltzmann, uno de los físicos más perspicaces que trabajó a principios del siglo pasado. En 1906, con problemas de salud y sufriendo una depresión, Boltzmann se suicidó mientras estaba de vacaciones con su esposa e hija en Italia. Irónicamente, sólo unos meses después, los experimentos comenzaron a confirmar que las ideas que Boltzmann había pasado su vida defendiendo apasionadamente eran correctas.

La noción de entropía fue desarrollada por primera vez durante la revolución industrial por científicos preocupados por el funcionamiento de los hornos y las máquinas de vapor, que ayudaron a desarrollar el campo de la termodinámica. A través de muchos años de investigación, las ideas subyacentes se refinaron bruscamente, culminando en el enfoque de Boltzmann. Su versión de la entropía, expresada de forma concisa por la ecuación de su lápida, utiliza el razonamiento estadístico para proporcionar un vínculo entre el enorme número de ingredientes

individuales que componen un sistema físico y las propiedades generales del sistema.[4]

Para tener una idea de las ideas, imagínese desenvolviendo una copia de Guerra *y Paz,* lanzando sus 693 páginas de doble cara al aire, y luego reuniendo las hojas sueltas en una pila ordenada. [5] Al examinar la pila resultante, es mucho más probable que las páginas estén fuera de orden que en orden. La razón es obvia. Hay muchas maneras de mezclar el orden de las páginas, pero sólo una manera de que el orden sea correcto. Para estar en orden, por supuesto, las páginas deben estar dispuestas exactamente como 1, 2; 3, 4; 5, 6; y así sucesivamente, hasta 1.385, 1.386. Cualquier otro arreglo está fuera de orden. Una simple pero esencial observación es que, siendo todo lo demás igual, cuantas más formas haya de ocurrir algo, más probable será que ocurra. Y si algo puede suceder de *muchas* más maneras, como las páginas que caen en el orden numérico equivocado, es *mucho* más probable que suceda. Todos sabemos esto intuitivamente. Si compras un billete de lotería, sólo hay una forma de ganar. Si compras un millón de boletos, cada uno con números diferentes, hay un millón de formas de ganar, por lo que tus posibilidades de hacerte rico son un millón de veces mayores.

La entropía es un concepto que hace que esta idea sea precisa al contar el número de formas, coherentes con las leyes de la física, en las que cualquier situación física dada puede ser realizada. La *alta entropía significa que hay muchas maneras; la baja entropía significa que hay pocas maneras.* Si las páginas de *Guerra y Paz* están apiladas en el orden numérico apropiado, esa es una configuración de baja entropía, porque hay un solo y único orden que cumple con el criterio. Si las páginas están fuera de orden numérico, esa es una situación de alta entropía, porque un pequeño cálculo muestra que hay
12455219845377834336600293537049882916336110124638904513 68
8769126468955918529845043773940692947439507941893387518 7
6527656714059286627151367074739129571382353800016108126465
3018234205620571473206172029382902912502131702278211913473
5826558815410713601431193221575341597338554284672986913981
5159925119085867260993481056143034134383056377136715110570
4786941333912934192440961051428879847790853609508954014012
5932850632906034109513149466389839052676761042780416673015
4945522818861025024633866260360150888664701014297085458481
5141598392546876231295293347829518681237077459652243214888
7351679284483403000787170636684623843536242451673622861091
9853939181503076046890466491297894062503326518685837322713
6370247390401891094064988139838026545111487686489581649140
3426444110871911844164280902757137738090672587084302157950
1589916232045813012950834386537908191823777385214375363 12
2531641598589268105976528144801387748697026525462643937189
3927305921796747169166978155198569769269249467383642278227

3345776718073316240433636952771183674104284493472234779223
4027225630721193853912472880929072034271692377936207650190
4571097887744535443586803319160959249877443194986997700333
2494630732437553532290674481765795395621840329516814427104
2227608124289048716428664872403070364864934832509996672897
3446425310349300626622014604312051101093282396249251196897
8283306192150828270814393659987326849047994166839657747890
2124562796195600187060805768778947870098610692265944872693
4100008726998763399003025591685820639734851035629676461160
0225159200113722741273318074829547248192807653266407023083
2754286312646671501355905966429773337131834654748547607012
4233012872135321237328732721874825264039911049700172147564
7004992922645864352265011199999999999999999999999999999999
999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999
999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999999
9999999999999999-alrededor de 10^{1878} -diferente-de los arreglos de la página de pedidos. [6] Si se lanzan las páginas al aire y luego se juntan en una pila ordenada, es casi seguro que terminarán fuera de orden numérico, porque tales configuraciones tienen una entropía enormemente mayor -hay muchas más maneras de lograr un resultado fuera de orden- que la única disposición en la que están en el orden numérico correcto.

En principio, podríamos utilizar las leyes de la física clásica para averiguar exactamente dónde caerá cada página después de que toda la pila haya sido lanzada al aire. Así, también en principio, podríamos predecir con precisión la disposición resultante de las páginas [7] y por lo tanto (a diferencia de la mecánica cuántica, que ignoramos hasta el próximo capítulo) no parece haber necesidad de confiar en las nociones probabilísticas como cuál es el resultado más o menos probable que otro. Pero el razonamiento estadístico es a la vez poderoso y útil. Si Guerra *y Paz* fuera un panfleto de sólo un par de páginas podríamos ser capaces de completar con éxito los cálculos necesarios, pero sería imposible hacerlo para la verdadera Guerra y Paz. [8] Seguir el movimiento preciso de 693 trozos de papel que son atrapados por suaves corrientes de aire y se frotan, deslizan y aletean unos contra otros sería una tarea monumental, mucho más allá de la capacidad de incluso la más poderosa supercomputadora.

Además, y esto es crítico, tener la respuesta exacta no sería tan útil. Cuando se examina la pila de páginas resultante, se está mucho menos interesado en los detalles exactos de qué página resulta ser dónde que en la pregunta general de si las páginas están en el orden correcto. Si lo están, genial. Podrías sentarte y continuar leyendo sobre Anna Pavlovna y Nikolai Ilych Rostov, como siempre. Pero si encuentras que las páginas no están en el orden correcto, los detalles precisos de la disposición de las páginas son algo que probablemente te importaría poco. Si has visto una disposición de páginas desordenada, las has visto casi todas. A menos que por alguna extraña razón te quedes atascado en los

detalles de qué páginas aparecen aquí o allá en la pila, difícilmente notarás si alguien ha desordenado aún más la disposición de las páginas que te dieron inicialmente. La pila inicial se vería desordenada y la pila más desordenada también se vería desordenada. Así que no sólo el razonamiento estadístico es enormemente más fácil de llevar a cabo, sino que la respuesta que da -ordenada versus desordenada- es más relevante para nuestra verdadera preocupación, para el tipo de cosas de las que típicamente tomaríamos nota.

Este tipo de pensamiento de gran imagen es central para la base estadística del razonamiento entrópico. Así como cualquier boleto de lotería tiene las mismas posibilidades de ganar que cualquier otro, después de muchos lanzamientos de *Guerra y Paz* cualquier ordenamiento particular de las páginas es tan probable que ocurra como cualquier otro. Lo que hace que el razonamiento estadístico vuele es nuestra declaración de que hay dos *clases interesantes* de configuraciones de páginas: ordenadas y desordenadas. La primera clase tiene un miembro (la página correcta ordenada 1, 2; 3, 4; y así sucesivamente) mientras que la segunda clase tiene un gran número de miembros (todas las demás posibles páginas ordenadas). Estas dos clases son un conjunto sensato para usar ya que, como se ha dicho, captan la evaluación general y bruta que se haría al hojear cualquier disposición de páginas.

Aún así, podría sugerir que se hagan distinciones más finas entre estas dos clases, tales como arreglos con sólo un puñado de páginas fuera de orden, arreglos con sólo páginas del primer capítulo fuera de orden, y así sucesivamente. De hecho, a veces puede ser útil considerar estas clases intermedias. Sin embargo, el número de posibles arreglos de páginas en cada una de estas nuevas subclases es todavía extremadamente pequeño comparado con el número en la clase totalmente desordenada. Por ejemplo, el número total de arreglos fuera de orden que involucran sólo las páginas de la Primera Parte de Guerra *y Paz* es 10^{-178} del 1 por ciento del número total de arreglos fuera de orden que involucran todas las páginas. Por lo tanto, aunque en los lanzamientos iniciales del libro sin encuadernar la disposición de las páginas resultantes probablemente pertenecerá a una de las clases intermedias, no totalmente desordenadas, es casi seguro que si se repite la acción de lanzamiento muchas veces, el orden de las páginas finalmente no exhibirá ningún patrón obvio en absoluto. La disposición de las páginas evoluciona hacia la clase totalmente desordenada, ya que hay muchas disposiciones de páginas que se ajustan a este proyecto.

El ejemplo de Guerra *y Paz* pone de relieve dos características esenciales de la entropía. En primer lugar, *la entropía es una medida de la cantidad de desorden en un sistema físico.* Una alta entropía significa que muchos reordenamientos de los ingredientes que componen el sistema pasarían desapercibidos, y esto a su vez significa que el sistema está altamente desordenado (cuando las páginas de *Guerra y Paz* están todas mezcladas, cualquier otro desorden apenas se notará ya que simplemente deja las páginas en un estado de confusión). La baja entropía

significa que muy pocos reordenamientos pasarían desapercibidos, y esto a su vez significa que el sistema está altamente ordenado (cuando las páginas de Guerra *y Pa los sistemas físicos tienden a evolucionar hacia estados de mayor entropía.*

Por supuesto, al hacer que el concepto de entropía sea preciso y universal, la definición de la física no implica contar el número de reordenamientos de páginas de un libro u otro que lo dejan con el mismo aspecto, ya sea ordenado o desordenado. En cambio, la definición de la física cuenta el número de reordenamientos de los componentes fundamentales - átomos, partículas subatómicas, y así sucesivamente - que dejan sin cambios las burdas propiedades de "gran imagen" de un sistema físico dado. Como en el ejemplo de Guerra *y Paz, la baja entropía* significa que muy pocos reordenamientos pasarían desapercibidos, por lo que el sistema está muy ordenado, mientras que la alta entropía significa que muchos reordenamientos pasarían desapercibidos, y eso significa que el sistema está muy desordenado. [12]

Para un buen ejemplo de física, y uno que pronto resultará útil, pensemos en la botella de Coca-Cola a la que nos referimos antes. Cuando el gas, como el dióxido de carbono que estaba inicialmente confinado en la botella, se esparce uniformemente a través de una habitación, hay *muchos* reordenamientos de las moléculas individuales que no tendrán un efecto notable. Por ejemplo, si agitas los brazos, las moléculas de dióxido de carbono se moverán de un lado a otro, cambiando rápidamente de posición y velocidad. Pero en general, no habrá un efecto cualitativo en su disposición. Las moléculas se esparcieron uniformemente antes de agitar los brazos, y se esparcirán uniformemente después de que termines. La configuración de gas uniformemente esparcida es insensible a un enorme número de reordenamientos de sus componentes moleculares, y por lo tanto está en un estado de alta entropía. Por el contrario, si el gas se esparce en un espacio más pequeño, como cuando estaba en la botella, o confinado por una barrera a un rincón de la habitación, tiene una entropía significativamente menor. La razón es simple. Así como los libros más delgados tienen menos reordenamientos de páginas, los espacios más pequeños proporcionan menos lugares para que las moléculas se ubiquen, y así permiten menos reordenamientos.

Pero cuando se tuerce la tapa de la botella o se quita la barrera, se abre todo un nuevo universo a las moléculas de gas, y a través de sus golpes y empujones se dispersan rápidamente para explorarlo. ¿Por qué? Es el mismo razonamiento estadístico de las páginas de Guerra *y Paz.* Sin duda, algunos de los empujones moverán unas pocas moléculas de gas puramente dentro de la mancha inicial de gas o empujarán a unas pocas que han dejado la mancha de vuelta hacia la densa nube de gas inicial. Pero como el volumen de la habitación excede el de la nube inicial de gas, hay *muchos* más reordenamientos disponibles para las moléculas si se dispersan fuera de la nube que si permanecen dentro de ella. En promedio,

entonces, las moléculas de gas se difundirán desde la nube inicial y lentamente se acercarán al estado de estar esparcidas uniformemente por todo el cuarto. Así, la configuración inicial de menor entropía, con el gas agrupado en una pequeña región, evoluciona naturalmente hacia la configuración de mayor entropía, con el gas uniformemente esparcido en el espacio más grande. Y una vez que ha alcanzado tal uniformidad, el gas tenderá a mantener este estado de alta entropía: los golpes y empujones todavía causan que las moléculas se muevan de un lado a otro, dando lugar a un reordenamiento tras otro, pero la abrumadora mayoría de estos reordenamientos no afectan a la apariencia general del gas. Eso es lo que significa tener una alta entropía.[9]

En principio, como en las páginas de Guerra *y Paz,* podríamos usar las leyes de la física clásica para determinar con precisión dónde estará cada molécula de dióxido de carbono en un momento dado. Pero debido al enorme número de moléculas de CO_2 - alrededor de 10^{24} en una botella de Coca-Cola - llevar a cabo tales cálculos es prácticamente imposible. E incluso si, de alguna manera, fuéramos capaces de hacerlo, tener una lista de un millón de billones de billones de posiciones y velocidades de partículas difícilmente nos daría una idea de cómo se distribuyen las moléculas. Centrándonos en las características estadísticas de la gran imagen, si el gas está disperso o amontonado, es decir, si tiene una entropía alta o baja, es mucho más esclarecedor.

La entropía, la segunda ley y la flecha del tiempo

La tendencia de los sistemas físicos a evolucionar hacia estados de mayor entropía se conoce como la *segunda ley de la termodinámica.* (La primera ley es la familiar conservación de la energía.) Como se ha dicho anteriormente, la base de la ley es un simple razonamiento estadístico: hay más formas de que un sistema tenga una entropía superior, y "más formas" significa que es más probable que un sistema evolucione hacia una de estas configuraciones de alta entropía. Nótese, sin embargo, que esto no es una ley en el sentido convencional ya que, aunque tales eventos son raros e improbables, algo *puede* pasar de un estado de alta entropía a uno de baja entropía. Cuando se lanza al aire un montón de páginas desordenadas y luego se juntan en una pila ordenada, *pueden resultar* estar en perfecto orden numérico. No querrías apostar mucho a que esto ocurra, pero *es* posible. También es posible que los golpes y empujones sean los adecuados para hacer que todas las moléculas de dióxido de carbono dispersas se muevan en conjunto y vuelvan a su botella abierta de Coca-Cola. No contengas la respiración esperando este resultado tampoco, pero puede suceder. [10]

El gran número de páginas en Guerra *y Paz* y el gran número de moléculas de gas en la habitación es lo que hace que la diferencia de entropía entre los arreglos desordenados y ordenados sea tan enorme, y lo que hace que los resultados de

baja entropía sean tan terriblemente improbables. Si lanzara sólo dos páginas de doble cara al aire una y otra vez, encontraría que aterrizan en el orden correcto alrededor del 12,5 por ciento de las veces. Con tres páginas esto bajaría a un 2% de los lanzamientos, con cuatro páginas es un 0,3%, con cinco páginas es un 0,03%, con seis páginas es un 0,002%, con diez páginas es un 0,000000027%, y con 693 páginas el porcentaje de lanzamientos que daría el orden correcto es tan pequeño -incluye tantos ceros después del punto decimal- que he sido convencido por el editor de no usar otra página para escribirlo explícitamente. De manera similar, si se dejan caer sólo dos moléculas de gas una al lado de la otra en una botella de Coca-Cola vacía, se encontraría que a temperatura ambiente su movimiento aleatorio las volvería a juntar (con una diferencia de un milímetro entre sí), en promedio, aproximadamente cada pocos segundos. Pero para un grupo de tres moléculas, tendrías que esperar días, para cuatro moléculas tendrías que esperar años, y para un grupo inicial denso de un millón de billones de moléculas, tomaría un tiempo mucho mayor que la edad actual del universo para que su movimiento aleatorio y dispersivo las volviera a juntar en un pequeño y ordenado grupo. Con más certeza que la muerte y los impuestos, podemos contar con sistemas con muchos componentes que evolucionan hacia el desorden.

Aunque no sea inmediatamente evidente, hemos llegado a un punto intrigante. La segunda ley de la termodinámica parece habernos dado una flecha de tiempo, *una que emerge cuando los sistemas físicos tienen un gran número de componentes.* Si usted viera una película de un par de moléculas de dióxido de carbono que han sido colocadas juntas en una pequeña caja (con un trazador que muestra los movimientos de cada una), sería difícil decir si la película está corriendo hacia adelante o hacia atrás. Las dos moléculas revoloteaban de esta manera y de otra, a veces se juntaban, a veces se separaban, pero no mostraban ningún comportamiento general grosero que distinguiera una dirección en el tiempo de la inversa. Sin embargo, si usted viera una película de 10 a 24 moléculas de dióxido de carbono que habían sido colocadas juntas en la caja (como una pequeña y densa nube de moléculas, por ejemplo), podría determinar fácilmente si la película se mostraba hacia adelante o hacia atrás: es abrumadoramente probable que la dirección del tiempo hacia adelante sea aquella en la que las moléculas de gas se dispersan más y más uniformemente, *logrando una entropía cada vez mayor.* Si, en cambio, la película mostrara moléculas de gas uniformemente dispersas que se unen en un grupo apretado, inmediatamente reconocería que la estaba viendo en reversa.

El mismo razonamiento se aplica esencialmente a todas las cosas que encontramos en la vida diaria, es decir, que tienen un gran número de componentes: la flecha hacia adelante en el tiempo apunta en la dirección de la creciente entropía. Si se ve una película de un vaso de agua helada colocado en una barra, se puede determinar qué dirección está adelante en el tiempo comprobando que el hielo se derrite - sus moléculas H_2O se dispersan por todo el vaso, logrando así una mayor entropía. Si se ve una película de un huevo

salpicando, se puede determinar la dirección en la que se avanza en el tiempo comprobando que los componentes del huevo se desordenan cada vez más, que el huevo salpica en lugar de desparramarse, logrando así una mayor entropía.

Como pueden ver, el concepto de entropía proporciona una versión precisa de la conclusión "fácil versus difícil" que encontramos anteriormente. Es fácil que las páginas de Guerra *y Paz caigan en desorden* porque ha*muchos arreglos* fuera de orden. Es difícil que las páginas caigan en perfecto orden porque cientos de páginas tendrían que moverse en la forma correcta para aterrizar en la secuencia única que Tolstoi pretendía. Es fácil que un huevo salpique porque ha*muchas* maneras de salpicar. Es difícil que un huevo se desparrame, porque un enorme número de componentes salpicados deben moverse en perfecta coordinación para producir el resultado único e irrepetible de un huevo prístino que descansa en el mostrador. Para las cosas con muchos componentes, ir de una entropía más baja a una más alta, de un orden a un desorden, es fácil, así que sucede todo el tiempo. Ir de una entropía más alta a una más baja, de un desorden a otro, es más difícil, así que sucede raramente, en el mejor de los casos.

Obsérvese también que esta flecha entrópica no es completamente rígida; no se puede afirmar que esta definición de la dirección del tiempo sea 100 por ciento infalible. En cambio, el enfoque tiene suficiente flexibilidad para permitir que estos y otros procesos también sucedan a la inversa. Dado que la segunda ley proclama que el aumento de la entropía es sólo una probabilidad estadística, y no un hecho inviolable de la naturaleza, permite la rara posibilidad de que las páginas puedan caer en un orden numérico perfecto, que las moléculas de gas puedan unirse y volver a entrar en un frasco, y que los huevos puedan desparramarse. Utilizando las matemáticas de la entropía, la segunda ley expresa con precisión cuán estadísticamente improbables son estos eventos (recuerde, el enorme número de las páginas 152-53 refleja cuán probable es que las páginas caigan fuera de orden), pero reconoce que pueden suceder.

Esto parece una historia convincente. El razonamiento estadístico y probabilístico nos ha dado la segunda ley de la termodinámica. A su vez, la segunda ley nos ha proporcionado una distinción intuitiva entre lo que llamamos pasado y lo que llamamos futuro. Nos ha dado una explicación práctica de por qué las cosas de la vida diaria, cosas que están típicamente compuestas de grandes cantidades de componentes, comienzan así *y terminan* así*,* mientras que nunca las vemos comenzar *así*y terminar así*.* Pero a lo largo de muchos años, y gracias a importantes contribuciones de físicos como Lord Kelvin, Josef Loschmidt, Henri Poincaré, S. H. Burbury, Ernst Zermelo y Willard Gibbs-Ludwig Boltzmann llegaron a apreciar que la historia completa de la flecha del tiempo es más sorprendente. Boltzmann se dio cuenta de que aunque la entropía había iluminado aspectos importantes del rompecabezas, *no* había respondido a la pregunta de por qué el pasado y el futuro parecen tan diferentes. En cambio, la entropía había redefinido la pregunta de una manera importante, una que lleva a una conclusión inesperada.

Entropía: Pasado y futuro

Anteriormente, introdujimos el dilema del pasado contra el futuro comparando nuestras observaciones cotidianas con las propiedades de las leyes de Newton de la física clásica. Enfatizamos que continuamente experimentamos una direccionalidad obvia a la forma en que las cosas se desarrollan en el tiempo, pero las propias leyes tratan lo que llamamos hacia adelante y hacia atrás en el tiempo en una base exactamente igual. Como no hay ninguna flecha dentro de las leyes de la física que asigne una dirección al tiempo, ningún puntero que declare: "Usar estas leyes en esta orientación temporal pero no al revés", nos vimos obligados a preguntar: Si las leyes que subyacen a la experiencia tratan ambas orientaciones temporales simétricamente, ¿por qué las experiencias en sí mismas están tan desequilibradas temporalmente, sucediendo siempre en una dirección pero no en la otra? ¿De dónde proviene la direccionalidad observada y experimentada del tiempo?

En la última sección parecíamos haber progresado, a través de la segunda ley de la termodinámica, que aparentemente señala el futuro como la dirección en la que aumenta la entropía. Pero pensándolo bien, no es tan simple. Obsérvese que en nuestra discusión sobre la entropía y la segunda ley, no modificamos las leyes de la física clásica de ninguna manera. En su lugar, todo lo que hicimos fue usar las leyes en un marco estadístico "general": ignoramos los detalles finos (el orden preciso de las páginas sin encuadernar de *Guerra y Paz, las ubicaciones y velocidades precisas* de los constituyentes de un huevo, las ubicaciones y velocidades precisas de una botella de Coca-Cola con moléculas de CO_2) y en su lugar centramos nuestra atención en las características generales y groseras (páginas ordenadas vs. no ordenadas, huevo salpicado vs. no salpicado, moléculas de gas esparcidas vs. no esparcidas). Encontramos que cuando los sistemas físicos son suficientemente complicados (libros con muchas páginas, objetos frágiles que pueden salpicar en muchos fragmentos, gas con muchas moléculas), hay una enorme diferencia en la entropía entre sus configuraciones ordenadas y desordenadas. Y esto significa que hay una enorme probabilidad de que los sistemas evolucionen de una entropía más baja a una más alta, lo cual es una afirmación aproximada de la segunda ley de la termodinámica. Pero el hecho clave que hay que tener en cuenta es que la segunda ley es derivada: es simplemente una consecuencia del razonamiento probabilístico aplicado a las leyes de movimiento de Newton.

Esto nos lleva a un simple pero asombroso punto: Dado que *las leyes de la física de Newton no tienen una orientación temporal incorporada, todo el razonamiento que hemos utilizado para argumentar que los sistemas evolucionarán de una entropía más baja a más alta hacia el futuro funciona igualmente bien cuando se aplica hacia el pasado.* De nuevo, dado que las leyes subyacentes de la física son simétricas en el tiempo, no hay forma de que puedan siquiera distinguir entre lo que llamamos el pasado y lo que llamamos el futuro. Así como no hay señales en

la profunda oscuridad del espacio vacío que declaren esta dirección hacia arriba y hacia abajo, no hay nada en las leyes de la física clásica que diga que esta dirección es el tiempo futuro y que esa dirección es el tiempo pasado. Las leyes no ofrecen ninguna orientación temporal; es una distinción a la que son completamente insensibles. Y dado que las leyes del movimiento son responsables de cómo cambian las cosas, tanto hacia lo que llamamos el futuro como hacia lo que llamamos el pasado, el razonamiento estadístico/probabilístico detrás de la segunda ley de la termodinámica se aplica igualmente bien en ambas direcciones temporales. Así, *no sólo existe una probabilidad abrumadora de que la entropía de un sistema físico sea mayor en lo que llamamos* el *futuro, sino que existe la misma probabilidad abrumadora de que fuera mayor en lo que llamamos el pasado.* Ilustramos esto en la figura 6.2.

Este es *el* punto clave para todo lo que sigue, pero también es engañosamente sutil. Un error común es que si, según la segunda ley de la termodinámica, la entropía aumenta hacia el futuro, entonces la entropía necesariamente *disminuye* hacia el pasado. Pero ahí es donde entra la sutileza. La segunda ley dice en realidad que si en un momento dado de interés, un sistema físico resulta no poseer la máxima entropía posible, es extraordinariamente probable que el sistema físico posteriormente tenga *y haya* tenido previamente más entropía. Ese es el contenido de la figura 6.2b. Con leyes que son ciegas a la distinción entre pasado y futuro, esa simetría temporal es inevitable.

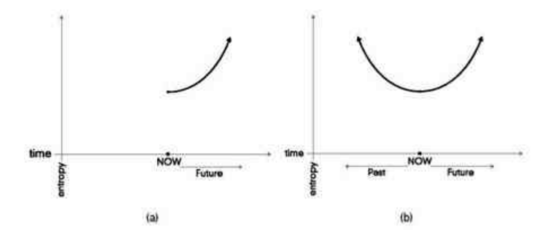


Figura 6.2 a) Como se suele describir, la segunda ley de la termodinámica implica que la entropía aumenta hacia el futuro de un momento dado. b) Como las leyes de la naturaleza conocidas tratan de manera idéntica hacia adelante y hacia atrás en el tiempo, la segunda ley implica en realidad que la entropía aumenta tanto hacia el futuro como hacia el pasado de cualquier momento dado.

Esa es la lección esencial. Nos dice que la flecha entrópica del tiempo es de *doble cabeza.* Desde cualquier momento específico, la flecha de aumento de entropía apunta hacia el futuro *y* hacia el pasado. Y eso hace que sea decididamente incómodo proponer la entropía como la explicación de la flecha *unidireccional* del tiempo experimental.

Piensa en lo que la flecha entrópica de doble cabeza implica en términos concretos. Si es un día caluroso y ves cubos de hielo parcialmente derretidos en

un vaso de agua, tienes plena confianza de que media hora más tarde los cubos estarán más derretidos, ya que cuanto más derretidos estén, más entropía tienen. [11] Pero debes tener exactamente la misma confianza de que media hora antes también estaban más derretidos, ya que *exactamente* el mismo razonamiento estadístico implica que la entropía debe aumentar hacia el pasado. Y la misma conclusión se aplica a los innumerables ejemplos que encontramos cada día. Su certeza de que la entropía aumenta hacia el futuro, desde que las moléculas de gas parcialmente dispersas se dispersan más hasta que las órdenes de páginas parcialmente desordenadas se desordenan más, debería corresponderse con *exactamente* la misma certeza de que la entropía también fue mayor en el pasado.

Lo preocupante es que la mitad de estas conclusiones parecen estar totalmente equivocadas. El razonamiento entrópico produce conclusiones precisas y sensatas cuando se aplica en una dirección temporal, hacia lo que llamamos el futuro, pero da conclusiones aparentemente inexactas y aparentemente ridículas cuando se aplica hacia lo que llamamos el pasado. Los vasos de agua con cubos de hielo parcialmente derretidos no suelen empezar como vasos de agua sin cubos de hielo en los que las moléculas de agua se unen y se enfrían en trozos de hielo, sólo para empezar a derretirse de nuevo. Las páginas no encuadernadas de *Guerra y Paz no suelen empezar completamente* fuera de orden numérico y a través de los lanzamientos posteriores se mezclan menos, sólo para empezar a mezclarse más de nuevo. Y volviendo a la cocina, los huevos no suelen empezar salpicados, y luego se fusionan en un huevo entero prístino, sólo para salpicar algún tiempo después.

¿O no?

Siguiendo las matemáticas

Siglos de investigaciones científicas han demostrado que las matemáticas proporcionan un poderoso e incisivo lenguaje para analizar el universo. De hecho, la historia de la ciencia moderna está repleta de ejemplos en los que las matemáticas hicieron predicciones que parecían contrarias tanto a la intuición como a la experiencia (que el universo contiene agujeros negros, que el universo tiene antimateria, que las partículas distantes pueden enredarse, y así sucesivamente) pero que los experimentos y las observaciones pudieron confirmar en última instancia. Tales desarrollos han impresionado profundamente en la cultura de la física teórica. Los físicos se han dado cuenta de que las matemáticas, cuando se usan con suficiente cuidado, son un camino probado hacia la verdad.

Así, cuando un análisis matemático de las leyes de la naturaleza muestra que la entropía debería ser mayor hacia el futuro *y* hacia el pasado de un momento dado, los físicos no lo descartan de plano. En cambio, algo parecido al juramento hipocrático de los físicos impulsa a los investigadores a mantener un profundo y

saludable escepticismo de las aparentes verdades de la experiencia humana y, con la misma actitud escéptica, seguir diligentemente las matemáticas y ver a dónde conducen. Sólo entonces podremos evaluar e interpretar correctamente cualquier desajuste que quede entre la ley física y el sentido común.

Hacia este fin, imagina que son las 10:30 p.m. y que durante la última media hora has estado mirando fijamente un vaso de agua helada (es una noche lenta en el bar), observando cómo los cubos se derriten lentamente en pequeñas formas deformes. No tienes ninguna duda de que media hora antes el camarero puso cubitos de hielo totalmente formados en el vaso; no tienes ninguna duda porque confías en tu memoria. Y si, por casualidad, tu confianza en lo que ha pasado durante la última media hora se ve sacudida, puedes preguntarle al tipo de enfrente, que también estaba viendo cómo se derretían los cubitos de hielo (es una noche *muy* lenta en el bar), o quizás comprobar el vídeo grabado por la cámara de vigilancia del bar, lo que confirmaría que tu memoria es exacta. Si entonces te preguntaras qué esperas que suceda con los cubitos de hielo durante la siguiente media hora, probablemente concluirías que seguirán derritiéndose. Y, si se hubiera familiarizado lo suficiente con el concepto de entropía, explicaría su predicción apelando a la abrumadora probabilidad de que la entropía aumente a partir de lo que ve, ahora mismo a las 10:30 p.m., hacia el futuro. Todo eso tiene sentido y se burla de nuestra intuición y experiencia.

Pero como hemos visto, tal razonamiento entrópico - razonamiento que simplemente dice que las cosas son más propensas a ser desordenadas ya que hay más formas de ser desordenadas, el razonamiento que es demostrablemente poderoso para explicar cómo se desarrollan las cosas hacia el futuro - proclama que la entropía es igual de probable que también haya sido mayor en el pasado. Esto significaría que los cubos parcialmente derretidos que se ven a las 10:30 p.m. en realidad se habrían derretido *más en épocas* anteriores; significaría que a las 10:00 p.m. no comenzaron como cubos de hielo sólido, sino que, en su lugar, se fusionaron lentamente en agua a temperatura ambiente en su camino hacia las 10:30 p.m., con la misma seguridad con que se derretirán lentamente en agua a temperatura ambiente en su camino hacia las 11:00 p.m.

Sin duda, eso suena raro, o tal vez diría que loco. Para ser cierto, no sólo las moléculas de H_2O en un vaso de agua a temperatura ambiente tendrían que unirse espontáneamente en cubos de hielo parcialmente formados, sino que los bits digitales de la cámara de vigilancia, así como las neuronas de su cerebro y las del cerebro del tipo de enfrente, tendrían que arreglarse espontáneamente antes de las 10:30 de la noche para dar fe de que ha habido una colección de cubos de hielo totalmente formados que se han derretido, aunque nunca la hubo. Sin embargo, esta conclusión tan extraña es donde una aplicación fiel del razonamiento entrópico -el mismo razonamiento que abrazas sin dudarlo para explicar por qué el hielo parcialmente derretido que ves a las 10:30 p.m. continúa derritiéndose hacia las 11:00 p.m.- conduce cuando se aplica de manera simétrica

en el tiempo dictada por las leyes de la física. Este es el problema de tener leyes fundamentales de movimiento sin distinción incorporada entre el pasado y el futuro, leyes cuyas matemáticas tratan el futuro y el pasado de cualquier momento dado exactamente de la misma manera.[12]

Tengan la seguridad de que pronto encontraremos una salida del extraño lugar al que nos ha llevado un uso igualitario del razonamiento entrópico; no voy a intentar convencerles de que sus recuerdos y registros son de un pasado que nunca ocurrió (disculpas a los fans de *The Matrix*). Pero nos será muy útil para señalar con precisión la disyunción entre la intuición y las leyes matemáticas. Así que sigamos el rastro.

Un atolladero

Su intuición se opone a un pasado con mayor entropía porque, cuando se lo ve en el desarrollo habitual de los acontecimientos en el tiempo futuro, requeriría un aumento espontáneo del orden: las moléculas de agua se enfrían espontáneamente a 0 grados centígrados y se convierten en hielo, los cerebros adquieren espontáneamente recuerdos de cosas que no ocurrieron, las cámaras de vídeo producen espontáneamente imágenes de cosas que nunca fueron, y así sucesivamente, todo lo cual parece extraordinariamente poco probable, una explicación propuesta del pasado de la que incluso Oliver Stone se burlaría. En este punto, las leyes físicas y las matemáticas de la entropía concuerdan completamente con su intuición. Tal secuencia de eventos, cuando se ve en la dirección del tiempo hacia adelante desde las 10 p.m. hasta las 10:30 p.m., va en contra de la veta de la segunda ley de la termodinámica - resulta en una disminución de la entropía - y por lo tanto, aunque no es imposible, *es* muy poco probable.

Por el contrario, su intuición y experiencia le dicen que una secuencia de eventos mucho más probable es que los cubos de hielo que se formaron completamente a las 10 p.m. se derritieron parcialmente en lo que ve en su vaso, ahora mismo, a las 10:30 p.m. Pero en este punto, las leyes físicas y matemáticas de la entropía sólo coinciden parcialmente con su expectativa. Las matemáticas y la intuición coinciden en que *si* realmente hubiera cubos de hielo totalmente formados a las 10 p.m., entonces la secuencia de eventos más probable sería que se derritieran en los cubos parciales que ves a las 10:30 p.m.: el aumento resultante de la entropía está en línea tanto con la segunda ley de la termodinámica como con la experiencia. Pero donde las matemáticas y la intuición se desvían es que nuestra intuición, a diferencia de las matemáticas, no tiene en cuenta la probabilidad, o la falta de ella, de tener realmente cubos de hielo totalmente formados a las 10 p.m., *dada la única observación que estamos tomando como incuestionable, como*

totalmente fiable, de *que ahora mismo, a las 10:30 p.m., se ven cubos parcialmente derretidos.*

Este es el punto crucial, así que déjame explicarte. La principal lección de la segunda ley de la termodinámica es que los sistemas físicos tienen una tendencia abrumadora a estar en configuraciones de alta entropía porque hay muchas maneras en que tales estados pueden ser realizados. Y una vez en tales estados de alta entropía, los sistemas físicos tienen una abrumadora tendencia a permanecer en ellos. La alta entropía es el estado natural del ser. Nunca debe sorprenderse o sentir la necesidad de explicar por qué cualquier sistema físico está en un estado de alta entropía. Tales estados son la norma. Por el contrario, lo que sí es necesario explicar es por qué cualquier sistema físico está en un estado de orden, un estado de baja entropía. Estos estados no son la norma. Ciertamente pueden ocurrir. Pero desde el punto de vista de la entropía, tales estados ordenados son aberraciones raras que piden a gritos una explicación. Así que el único hecho del episodio que estamos tomando como incuestionablemente cierto - su observación a las 10:30 p.m. de los cubos de hielo parcialmente formados de baja entropía - es un hecho que necesita una explicación.

Y desde el punto de vista de la probabilidad, es absurdo explicar este estado de baja entropía invocando el estado de entropía aún *más bajo, el* estado *aún menos probable*, de que a las 10 p.m. se observaran cubos de hielo *aún más ordenados y completamente formado*en un entorno *más*prístino y ordenado. En cambio, es enormemente más probable que las cosas comenzaran en un estado no sorprendente, totalmente normal y de alta entropía: un vaso de agua líquida uniforme sin absolutamente nada de hielo. Luego, a través de una fluctuación estadística improbable, pero a menudo esperable, el vaso de agua fue en contra de la veta de la segunda ley y evolucionó a un estado de menor entropía en el que aparecieron cubos de hielo parcialmente formados. Esta evolución, aunque requiere procesos raros y poco familiares, evita completamente la entropía aún más baja, el estado aún menos probable, aún más raro, de haber formado *completamente los cubos de hielo*. En cada momento entre las 10 p.m. y las 10:30 p.m., esta evolución de sonido extraño tiene una entropía más alta que el escenario normal de fusión de hielo, como se puede ver en la Figura 6.3, y por lo tanto realiza la observación aceptada a las 10:30 p.m. de una manera que es *más probable -enormemente* más probable- que el escenario en el que los cubos de hielo totalmente formados se derriten. [13] Ese es el quid de la cuestión. [13]

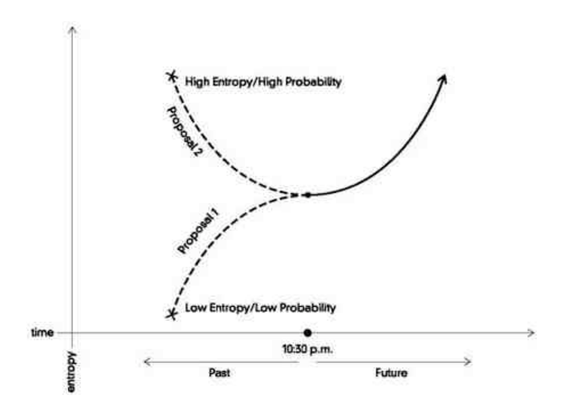


Figura 6.3 Una comparación de dos propuestas de cómo los cubitos de hielo llegaron a su estado parcialmente derretido, en este momento, a las 10:30 p.m. La propuesta 1 se alinea con sus recuerdos de hielo derretido, pero requiere un punto de partida comparativamente de baja entropía a las 10:00 p.m. La propuesta 2 desafía tus recuerdos describiendo el hielo parcialmente derretido que ves a las 10:30 p.m. como si se hubiera coalescido en un vaso de agua, pero comienza en una configuración de desorden de alta entropía, altamente probable, a las 10:00 p.m. Cada paso del camino hacia las 10:30 p.m., la Propuesta 2 involucra estados que son más probables que los de la Propuesta 1, porque, como se puede ver en el gráfico, tienen mayor entropía, y por lo tanto la Propuesta 2 es estadísticamente favorecida.

Fue un pequeño paso para que Boltzmann se diera cuenta de que todo el universo está sujeto a este mismo análisis. Cuando miras alrededor del universo ahora mismo, lo que ves refleja una gran cantidad de organización biológica, estructura química y orden físico. Aunque el universo podría ser un desastre totalmente desorganizado, no lo es. ¿Por qué es así? ¿De dónde vino el orden? Bueno, al igual que con los cubos de hielo, desde el punto de vista de la probabilidad es extremadamente improbable que el universo que vemos haya evolucionado de un estado aún más ordenado, incluso menos probable, en el pasado lejano, que se haya desenvuelto lentamente hasta su forma actual. Más bien, debido a que el cosmos tiene tantos componentes, las escalas de ordenado versus desordenado se magnifican intensamente. Y así lo que es cierto en el bar es cierto con una venganza para todo el universo: es *mucho* más probable -increíblemente más probable- que todo el universo que vemos ahora surgió como una fluctuación estadísticamente rara de una configuración normal, no sorprendente, de alta entropía y completamente desordenada.

Piénsalo de esta manera: si lanzas un puñado de centavos una y otra vez, tarde o temprano todos ellos caerán en cabeza. Si tienes casi la infinita paciencia necesaria para tirar al aire las páginas mezcladas de *Guerra y Paz* una y otra vez, tarde o temprano aterrizarán en el orden numérico correcto. Si esperas con tu botella abierta de Coca-Cola plana, tarde o temprano el choque aleatorio de las

moléculas de dióxido de carbono hará que vuelvan a entrar en la botella. Y, para sorpresa de Boltzmann, si el universo espera lo suficiente -por casi una eternidad, tal vez- su habitual estado de alta entropía, altamente probable y totalmente desordenado, a través de sus propios choques, empujones y corrientes aleatorias de partículas y radiación, tarde o temprano se fusionará con la configuración que todos vemos ahora. Nuestros cuerpos y cerebros emergerían totalmente formados del caos -provistos de recuerdos, conocimientos y habilidades- aunque el pasado que parecen reflejar nunca hubiera ocurrido realmente. Todo lo que conocemos, todo lo que valoramos, no sería más que una rara pero a menudo esperable fluctuación estadística que interrumpiría momentáneamente una casi eternidad de desorden. Esto se ilustra esquemáticamente en la figura 6.4.

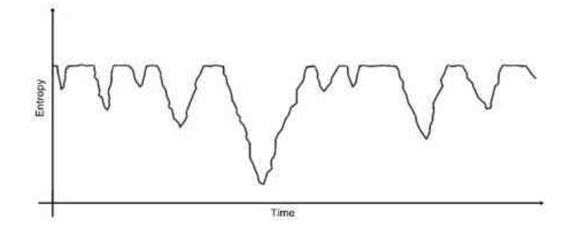


Figura 6.4 Un gráfico esquemático de la entropía total del universo a través del tiempo. El gráfico muestra que el universo pasa la mayor parte de su tiempo en un estado de desorden total -un estado de alta entropía- y que de vez en cuando experimenta fluctuaciones a estados de diversos grados de orden, estados variables de menor entropía. Cuanto mayor sea la caída de la entropía, menos probable será la fluctuación. Los descensos significativos de entropía, al tipo de orden que existe en el universo hoy en día, son extremadamente improbables y ocurrirían muy raramente.

Dando un paso atrás

Cuando me encontré con esta idea hace muchos años, fue un poco chocante. Hasta ese momento, había pensado que entendía el concepto de entropía bastante bien, pero el hecho era que, siguiendo el enfoque de los libros de texto que había estudiado, sólo había considerado las implicaciones de la entropía para el futuro. Y, como acabamos de ver, mientras que la entropía aplicada hacia el futuro confirma nuestra intuición y experiencia, la entropía aplicada hacia el pasado también las contradice completamente. No fue tan malo como enterarse de repente de que has sido traicionado por un viejo amigo, pero para mí, estuvo bastante cerca.

No obstante, a veces es bueno no emitir juicios demasiado rápidos, y la aparente incapacidad de la entropía para cumplir las expectativas es un ejemplo de ello. Como probablemente estéis pensando, la idea de que todo lo que conocemos

acaba de aparecer en la existencia es tan tentadora como difícil de tragar. Y no es "meramente" que esta explicación del universo desafíe la veracidad de todo lo que consideramos real e importante. También deja preguntas críticas sin respuesta. Por ejemplo, cuanto más ordenado está el universo hoy en día, cuanto mayor es la caída en la figura 6.4, más sorprendente e improbable es la aberración estadística necesaria para que exista. Así que si el universo podría haber tomado cualquier atajo, haciendo que las cosas se parecieran más o menos a lo que vemos ahora mismo mientras escatimaba en la cantidad real de orden, el razonamiento probabilístico nos lleva a creer que lo habría hecho. Pero cuando examinamos el universo, parece haber numerosas oportunidades perdidas, ya que hay muchas cosas que están más ordenadas de lo que tienen que estar. Si Michael Jackson nunca grabó *Thriller* y los millones de copias de este álbum que ahora se distribuyen por todo el mundo llegaron allí como parte de una aberrante fluctuación hacia una menor entropía, la aberración habría sido mucho menos extrema si sólo se hubiera formado un millón o medio millón o sólo unos pocos álbumes. Si la evolución nunca ocurrió y los humanos llegamos aquí por un salto aberrante hacia la baja entropía, la aberración habría sido mucho menos extrema si no hubiera habido un registro fósil evolutivo tan consistente y ordenado. Si el big bang nunca ocurrió y las más de 100 mil millones de galaxias que vemos ahora surgieron como un salto aberrante hacia la entropía inferior, la aberración habría sido menos extrema si hubiera 50 mil millones, o 5.000, o sólo un puñado, o sólo una galaxia. Así que si la idea de que nuestro universo es una fluctuación estadística -una feliz casualidad- tiene alguna validez, uno tendría que abordar cómo y por qué el universo se fue tan lejos por la borda y alcanzó un estado de *tan* baja entropía.

Aún más apremiante, si no puedes confiar en los recuerdos y los registros, entonces tampoco puedes confiar en las leyes de la física. Su validez se basa en numerosos experimentos cuyos resultados positivos se atestiguan sólo por esos mismos recuerdos y registros. Así que todo el razonamiento basado en la simetría de tiempo inverso de las leyes de la física aceptadas se pondría totalmente en duda, socavando así nuestra comprensión de la entropía y toda la base de la discusión actual. Al aceptar la conclusión de que el universo que conocemos es una fluctuación estadística rara, pero a menudo esperable, de una configuración de desorden total, nos vemos rápidamente abocados a un atolladero en el que perdemos toda la comprensión, incluida la misma cadena de razonamiento que nos llevó a considerar una explicación tan extraña en primer lugar.[14]

Por lo tanto, al suspender la incredulidad y seguir diligentemente las leyes de la física y las matemáticas de la entropía -conceptos que en combinación nos dicen que es abrumadoramente probable que el desorden aumente tanto hacia el futuro *como* hacia el pasado a partir de un momento dado- nos hemos metido hasta el cuello en arenas movedizas. Y mientras que eso podría no sonar agradable, por dos razones es algo muy bueno. Primero, muestra con precisión por qué la desconfianza en los recuerdos y registros -algo de lo que intuitivamente nos burlamos- no tiene sentido. Segundo, al llegar a un punto en el que todo nuestro

andamiaje analítico está al borde del colapso, nos damos cuenta, con fuerza, que *debemos* haber dejado algo crucial fuera de nuestro razonamiento.

Por lo tanto, para evitar el abismo explicativo, nos preguntamos: ¿qué nueva idea o concepto, más allá de la entropía y la simetría temporal de las leyes de la naturaleza, necesitamos para volver a confiar en nuestros recuerdos y nuestros registros -nuestra experiencia de cubitos de hielo a temperatura ambiente que se derriten y no se deshacen, de crema y café que se mezclan pero no se deshacen, de huevos que se salpican pero no se deshacen? En resumen, ¿a dónde nos lleva si intentamos explicar un desarrollo asimétrico de los eventos en el espacio tiempo, con entropía hacia nuestro futuro más alto, pero entropía hacia nuestro pasado *más bajo*? ¿Es posible?

Lo es. Pero sólo si las cosas fueron muy especiales al principio.[14]

El huevo, la gallina y el Big Bang

Para ver lo que esto significa, tomemos el ejemplo de un huevo prístino, de baja entropía y completamente formado. ¿Cómo llegó a existir este sistema físico de baja entropía? Bueno, confiando en los recuerdos y registros, todos sabemos la respuesta. El huevo vino de una gallina. Y esa gallina vino de un huevo, que vino de una gallina, que vino de un huevo, y así sucesivamente. Pero, como enfatizó con más fuerza el matemático inglés Roger Penrose, [15] esta historia de la gallina y el huevo en realidad nos enseña algo profundo y nos lleva a un lugar definitivo.

Una gallina, o cualquier ser vivo, es un sistema físico de un orden asombrosamente alto. ¿De dónde viene esta organización y cómo se sostiene? Una gallina se mantiene viva, y en particular, se mantiene viva lo suficiente para producir huevos, comiendo y respirando. La comida y el oxígeno proporcionan las materias primas de las que los seres vivos extraen la energía que necesitan. Pero hay una característica crítica de esta energía que debe ser enfatizada si queremos entender realmente lo que está pasando. A lo largo de su vida, una gallina que se mantiene en forma toma tanta energía en forma de alimento como la que devuelve al medio ambiente, principalmente en forma de calor y otros residuos generados por sus procesos metabólicos y actividades diarias. Si no hubiera tal equilibrio entre la energía que entra y la que sale, el pollo se haría cada vez más fuerte.

El punto esencial, sin embargo, es que todas las formas de energía no son iguales. La energía que una gallina emite al medio ambiente en forma de calor es altamente desordenada, a menudo resulta en que algunas moléculas de aire aquí o allá se mueven alrededor de un toque más rápido de lo que lo harían de otra manera. Esta energía tiene una alta entropía, es difusa y está mezclada con el medio ambiente, y por lo tanto no puede ser fácilmente aprovechada para cualquier propósito útil. Por el contrario, la energía que el pollo toma de su

alimento tiene baja entropía y es fácilmente aprovechada para importantes actividades de mantenimiento de la vida. Así que el pollo, y cada forma de vida de hecho, es un conducto para tomar energía de baja entropía y emitir energía de alta entropía.

Esta comprensión hace retroceder un paso la cuestión de dónde se origina la baja entropía de un huevo. ¿Cómo es que la fuente de energía de la gallina, el alimento, tiene tan baja entropía? ¿Cómo explicamos esta aberrante fuente de orden? Si el alimento es de origen animal, nos lleva de vuelta a la pregunta inicial de cómo los animales tienen tan baja entropía. Pero si seguimos la cadena alimenticia, finalmente nos encontramos con animales (como yo) que sólo comen plantas. ¿Cómo es que las plantas y sus productos de frutas y vegetales mantienen una baja entropía? A través de la fotosíntesis, las plantas utilizan la luz solar para separar el dióxido de carbono del ambiente en oxígeno, que se devuelve al medio ambiente, y carbono, que las plantas utilizan para crecer y florecer. Así que podemos rastrear las fuentes de energía no animal de baja entropía hasta el sol.

Esto empuja la cuestión de explicar la baja entropía un paso más atrás: ¿de dónde vino nuestro altamente ordenado sol? El sol se formó hace unos 5.000 millones de años a partir de una nube de gas inicialmente difusa que comenzó a girar y agruparse bajo la atracción gravitatoria mutua de todos sus constituyentes. A medida que la nube de gas se hizo más densa, la atracción gravitatoria de una parte sobre otra se hizo más fuerte, causando que la nube se colapse más adentro de sí misma. Y a medida que la gravedad apretaba la nube más fuerte, se calentaba. En última instancia, se calentó lo suficiente como para encender procesos nucleares que generaron suficiente radiación hacia afuera para detener la contracción gravitacional del gas. Nació una estrella caliente, estable y brillantemente ardiente.

Entonces, ¿de dónde vino la nube difusa de gas? Probablemente se formó a partir de los restos de estrellas más antiguas que llegaron al final de sus vidas, se convirtieron en supernovas y arrojaron su contenido al espacio. ¿De dónde vino el gas difuso responsable de estas primeras estrellas? Creemos que el gas se formó después del Big Bang. Nuestras teorías más refinadas sobre el origen del universo -nuestras teorías *cosmológicas más* refinadas- nos dicen que para cuando el universo tenía un par de minutos de vida, estaba lleno de un *gas caliente casi uniforme* compuesto de aproximadamente un 75 por ciento de hidrógeno, un 23 por ciento de helio y pequeñas cantidades de deuterio y litio. El punto esencial es que este gas que llenaba el universo tenía una entropía extraordinariamente *baja*. El big bang inició el universo en un estado de baja entropía, y ese estado parece ser la fuente del orden que vemos actualmente. En otras palabras, *el orden actual es una reliquia cosmológica.* Discutamos esta importante realización con un poco más de detalle.

Entropía y gravedad

Debido a que la teoría y la observación muestran que a los pocos minutos del big bang, el gas primordial se esparció uniformemente por todo el joven universo, se podría pensar, dada nuestra anterior discusión sobre el Coque y sus moléculas de dióxido de carbono, que el gas primordial estaba en un estado desordenado de alta entropía. Pero esto resulta no ser cierto. Nuestra discusión anterior sobre la entropía ignoró completamente la gravedad, algo sensato porque la gravedad apenas juega un papel en el comportamiento de la mínima cantidad de gas que sale de una botella de Coca-Cola. Y con esa suposición, encontramos que el gas uniformemente disperso tiene una alta entropía. Pero cuando la gravedad importa, la historia es muy diferente. La gravedad es una fuerza de atracción universal; por lo tanto, si tienes una masa de gas lo suficientemente grande, cada región de gas tirará de cada una de las otras y esto causará que el gas se fragmente en grupos, de alguna manera como la tensión superficial causa que el agua en una hoja de papel encerado se fragmente en gotas. Cuando la gravedad importa, como lo hizo en el universo temprano de alta densidad, la norma es la aglomeración -no la uniformidad-; es el estado hacia el que un gas tiende a evolucionar, como se ilustra en la figura 6.5.

Aunque los grupos parecen estar más ordenados que el gas inicialmente difuso -como una sala de juegos con juguetes agrupados ordenadamente en troncos y cubos es más ordenada que una en la que los juguetes están uniformemente esparcidos por el suelo-, para calcular la entropía es necesario contar las contribuciones de *todas las* fuentes. Para la sala de juegos, la disminución de la entropía al pasar de juguetes salvajemente esparcidos a estar todos "amontonados" en troncos y cubos está más que compensada por el aumento de la entropía de la grasa quemada y el calor generado por los padres que pasaron horas limpiando y arreglando todo. De manera similar, para la nube de gas inicialmente difusa, se encuentra que la disminución de la entropía a través de la formación de grupos ordenados se compensa con creces por el calor generado a medida que el gas se comprime y, en última instancia, por la enorme cantidad de calor y luz liberada cuando los procesos nucleares comienzan a tener lugar.

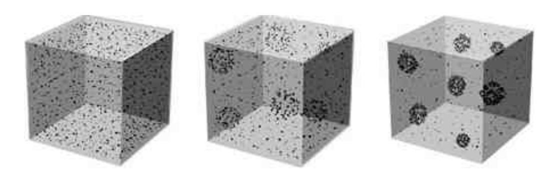


Figura 6.5 En el caso de grandes volúmenes de gas, cuando la gravedad importa, los átomos y las moléculas evolucionan de una configuración suave y uniformemente extendida a una que implica grupos más grandes y más densos.

Este es un punto importante que a veces se pasa por alto. El abrumador impulso hacia el desorden no significa que las estructuras ordenadas como las estrellas y los planetas, o las formas de vida ordenadas como las plantas y los animales, no puedan formarse. Sí pueden. Y obviamente lo hacen. Lo que la segunda ley de la termodinámica implica es que en la formación del orden hay generalmente una generación de desorden más que compensatoria. El balance de la entropía sigue en negro, aunque ciertos componentes se han ordenado más. Y de las fuerzas fundamentales de la naturaleza, la gravedad es la que explota esta característica de la entropía hasta la empuñadura. Debido a que la gravedad opera a través de vastas distancias y es universalmente atractiva, instiga la formación de los grupos ordenados - estrellas - que emiten la luz que vemos en un cielo nocturno claro, todo ello en consonancia con el balance neto del aumento de la entropía.

Cuanto más apretados, densos y masivos sean los grupos de gas, mayor será la entropía general. Los agujeros negros, la forma más extrema de aglomeración y compresión gravitatoria en el universo, llevan esto al límite. La atracción gravitatoria de un agujero negro es tan fuerte que nada, ni siquiera la luz, puede escapar, lo que explica por qué los agujeros negros son negros. Así, a diferencia de las estrellas ordinarias, los agujeros negros se aferran obstinadamente a toda la entropía que producen: nada puede escapar al poderoso agarre gravitatorio del agujero negro.[16] De hecho, como veremos en el capítulo 16, nada en el universo contiene más desorden -más entropía- que un agujero negro. [15] Esto tiene un buen sentido intuitivo: una alta entropía significa que muchas reorganizaciones de los componentes de un objeto pasan desapercibidas. Puesto que no podemos ver dentro de un agujero negro, es imposible que detectemos *cualquier reordenamiento* de sus constituyentes, sean cuales sean, y por lo tanto los agujeros negros tienen una entropía máxima. Cuando la gravedad flexiona sus músculos hasta el límite, se convierte en el generador de entropía más eficiente del universo conocido.

Hemos llegado al lugar donde el dinero finalmente se detiene. *La última fuente de orden, de baja entropía, debe ser el propio big bang.* En sus primeros momentos, en lugar de estar lleno de gigantescos contenedores de entropía como agujeros negros, como esperaríamos de consideraciones probabilísticas, por alguna razón el universo naciente estaba lleno de una mezcla caliente, uniforme y gaseosa de hidrógeno y helio. Aunque esta configuración tiene una entropía alta cuando las densidades son tan bajas que podemos ignorar la gravedad, la situación es otra cuando la gravedad no puede ser ignorada; entonces, un gas tan uniforme tiene una entropía extremadamente baja. En comparación con los agujeros negros, el gas difuso, casi uniforme, estaba en un estado de entropía extraordinariamente baja. Desde entonces, de acuerdo con la segunda ley de la termodinámica, la entropía general del universo ha ido aumentando gradualmente; la cantidad total y neta de desorden ha ido aumentando gradualmente. Después de unos mil millones de años, la gravedad hizo que el gas primordial se aglutinara, y los aglomerados acabaron formando estrellas, galaxias y algunos grupos más ligeros

que se convirtieron en planetas. Al menos uno de esos planetas tenía una estrella cercana que proporcionaba una fuente de energía de entropía relativamente baja que permitía la evolución de formas de vida de baja entropía, y entre esas formas de vida hubo finalmente una gallina que puso un huevo que encontró su camino hacia el mostrador de su cocina, y para su disgusto ese huevo continuó en la implacable trayectoria hacia un estado entrópico más alto rodando fuera del mostrador y salpicando en el suelo. El huevo salpica en lugar de desparramar porque lleva adelante el impulso hacia una mayor entropía que fue iniciado por el estado de entropía extraordinariamente baja con el que comenzó el universo. Un orden increíble al principio es lo que inició todo, y desde entonces hemos estado viviendo el despliegue gradual hacia un mayor desorden.

Esta es la impresionante conexión a la que nos hemos estado dirigiendo durante todo el capítulo.*Un huevo salpicado nos dice algo profundo sobre el big bang.* Nos dice que el big bang dio lugar a un cosmos naciente extraordinariamente ordenado.

La misma idea se aplica a todos los demás ejemplos. La razón por la que lanzar al aire las nuevas páginas sin encuadernar de *Guerra y Paz* resulta en un estado de mayor entropía es que *comenzaron* en una forma tan ordenada y de baja entropía. Su forma inicial ordenada las hizo maduras para el aumento de la entropía. Por el contrario, si las páginas inicialmente estaban totalmente fuera de orden numérico, lanzarlas al aire difícilmente haría una diferencia, en cuanto a la entropía se refiere. Así que la pregunta, una vez más, es: ¿cómo llegaron a estar tan ordenadas? Bueno, Tolstoi las escribió para ser presentadas en ese orden y el impresor y el encuadernador siguieron sus instrucciones. Y los cuerpos y mentes altamente ordenados de Tolstoi y los productores de libros, que les permitieron, a su vez, crear un volumen de tan alto orden, pueden explicarse siguiendo la misma cadena de razonamiento que acabamos de seguir para un huevo, que una vez más nos lleva de vuelta al big bang. ¿Qué hay de los cubos de hielo parcialmente derretidos que vio a las 10:30 p.m.? Ahora que estamos confiando en los recuerdos y los registros, recuerdas que justo antes de las 10 p.m. el camarero puso cubitos de hielo totalmente formados en tu vaso. Consiguió los cubitos de hielo de un congelador, que fue diseñado por un ingenioso ingeniero y fabricado por talentosos maquinistas, todos los cuales son capaces de crear algo de tan alto orden porque ellos mismos son formas de vida altamente ordenadas. Y de nuevo, podemos rastrear secuencialmente su orden hasta el origen altamente ordenado del universo.

La entrada crítica

La revelación a la que hemos llegado es que podemos confiar en nuestros recuerdos de un pasado con baja, no alta, entropía sólo si el big bang -el proceso,

evento o suceso que trajo el universo a la existencia- comenzó fuera del universo en un estado extraordinariamente especial y altamente ordenado de baja entropía. Sin ese aporte crítico, nuestra anterior comprensión de que la entropía debería aumentar tanto hacia el futuro como hacia el pasado desde cualquier momento dado nos llevaría a la conclusión de que todo el orden que vemos surgió de una fluctuación fortuita de un estado desordenado ordinario de alta entropía, una conclusión, como hemos visto, que socava el propio razonamiento en el que se basa. Pero al incluir el improbable punto de partida de baja entropía del universo en nuestro análisis, vemos ahora que la conclusión correcta es que la entropía aumenta hacia el futuro, ya que el razonamiento probabilístico opera plenamente y sin limitaciones en esa dirección; pero la entropía no aumenta hacia el pasado, ya que *ese* uso de la probabilidad se opondría a nuestra nueva condición de que el universo comenzó en un estado de baja, no alta, entropía. [17] Por lo tanto, las condiciones en el nacimiento del universo son críticas para dirigir la flecha del tiempo. *El futuro es, de hecho, la dirección de la creciente entropía. La flecha del tiempo -el hecho* de *que las cosas empiezan así* y terminan as*ípero nunca empiezan* asíy terminan *así- comenzó su vuelo en el* estado de entropía alta y baja del universo en su inicio. [18]

El rompecabezas restante

Que el universo primitivo fijó la dirección de la flecha del tiempo es una conclusión maravillosa y satisfactoria, pero no hemos terminado. Queda un enorme rompecabezas. ¿Cómo es que el universo comenzó en una configuración tan altamente ordenada, estableciendo las cosas de manera que durante miles de millones de años todo pudiera evolucionar lentamente a través de configuraciones cada vez menos ordenadas hacia una entropía cada vez mayor? No pierdas de vista lo notable que es esto. Como enfatizamos, desde el punto de vista de la probabilidad es mucho más probable que los cubos de hielo parcialmente derretidos que viste a las 10:30 p.m. lleguen allí porque una casualidad estadística se representó a sí misma en un vaso de agua líquida, que el hecho de que se hayan originado en el estado aún menos probable de cubos de hielo completamente formados. Y lo que es cierto para los cubos de hielo es cierto un billón de veces para todo el universo. Probablemente hablando, es asombrosamente más probable que todo lo que vemos ahora en el universo haya surgido de una rara pero a menudo esperable aberración estadística alejada del desorden total, en lugar de haber evolucionado lentamente desde el aún más improbable, el increíblemente más ordenado, el asombrosamente bajo punto de partida de entropía requerido por el big bang.[19]

Sin embargo, cuando fuimos con las probabilidades e imaginamos que todo surgió por casualidad estadística, nos encontramos en un atolladero: esa ruta puso en duda las leyes de la física misma. Así que nos inclinamos a evitar las apuestas e ir

con un big bang de baja entropía como la explicación para la flecha del tiempo. El rompecabezas entonces es explicar cómo comenzó el universo en una configuración tan poco probable y tan ordenada.*Esa* es la pregunta a la que apunta la flecha del tiempo. Todo se reduce a la cosmología. [20]

Retomaremos una discusión detallada de la cosmología en los capítulos 8 a 11, pero noten primero que nuestra discusión sobre el tiempo sufre de una seria deficiencia: todo lo que hemos dicho se ha basado puramente en la física clásica. Consideremos ahora cómo la mecánica cuántica afecta nuestra comprensión del tiempo y nuestra búsqueda de su flecha.

7 - El tiempo y el cuántico

LA COMPRENSIÓN DE LA NATURALEZA DEL TIEMPO DESDE EL REINO CUÁNTICO...

Cuando pensamos en algo como el tiempo, algo en lo que estamos, algo que está totalmente integrado en nuestra existencia diaria, algo que es tan omnipresente, que es imposible de eliminar, incluso momentáneamente, del lenguaje común, nuestro razonamiento está moldeado por la preponderancia de nuestras experiencias. Estas experiencias diarias son experiencias clásicas; con un alto grado de precisión, se ajustan a las leyes de la física establecidas por Newton hace más de tres siglos. Pero de todos los descubrimientos de la física durante los últimos cien años, la mecánica cuántica es con mucho el más sorprendente, ya que socava todo el esquema conceptual de la física clásica.

Así que vale la pena ampliar nuestras experiencias clásicas considerando algunos experimentos que revelan características de cómo los procesos cuánticos se desarrollan en el tiempo. En este contexto más amplio, continuaremos la discusión del último capítulo y nos preguntaremos si hay una flecha temporal en la descripción de la mecánica cuántica de la naturaleza. Llegaremos a una respuesta, pero que sigue siendo controvertida, incluso entre los físicos. Y una vez más nos llevará de vuelta al origen del universo.

El pasado según el Quantum

La probabilidad desempeñó un papel central en el último capítulo, pero como subrayé allí un par de veces, surgió sólo por su conveniencia práctica y la utilidad de la información que proporciona. Seguir el movimiento exacto de las 10^{24} H_2O moléculas en un vaso de agua está muy por encima de nuestra capacidad de cálculo, e incluso si fuera posible, ¿qué haríamos con la montaña de datos

resultante? Determinar a partir de una lista de 10^{24} posiciones y velocidades si hay cubitos de hielo en el vaso sería una tarea hercúlea. Así que recurrimos en cambio al razonamiento probabilístico, que es computable y, además, se ocupa de las propiedades macroscópicas - orden versus desorden; por ejemplo, hielo versus agua - que nos interesan en general. Pero tened en cuenta que la probabilidad no está de ninguna manera fundamentalmente cosida en el tejido de la física clásica. En principio, si supiéramos exactamente cómo son las cosas ahora -conocer las posiciones y velocidades de cada una de las partículas que componen el universo-, la física clásica dice que podríamos usar esa información para predecir cómo serían las cosas en un momento dado del futuro o cómo fueron en un momento dado del pasado. Ya sea que sigas o no su desarrollo momento a momento, de acuerdo con la física clásica puedes hablar del pasado y del futuro, en principio, con una confianza que está controlada por el detalle y la precisión de tus observaciones del presente. [1]

La probabilidad también desempeñará un papel central en este capítulo. Pero como la probabilidad *es* un elemento ineludible de la mecánica cuántica, altera fundamentalmente nuestra conceptualización del pasado y del futuro. Ya hemos visto que la incertidumbre cuántica impide el conocimiento simultáneo de posiciones exactas y velocidades exactas. En consecuencia, también hemos visto que la física cuántica predice sólo la probabilidad de que uno u otro futuro se realice. Tenemos confianza en estas probabilidades, para estar seguros, pero como son probabilidades aprendemos que hay un *inevitable* de azar cuando se trata de predecir el futuro.

Cuando se trata de describir el pasado, también hay una diferencia crítica entre la física clásica y la cuántica. En la física clásica, de acuerdo con su tratamiento igualitario de todos los momentos en el tiempo, los eventos que conducen a algo que observamos se describen usando exactamente el mismo lenguaje, empleando exactamente los mismos atributos, que usamos para describir la observación misma. Si vemos un meteoro ardiente en el cielo nocturno, hablamos de su posición y su velocidad; si reconstruimos cómo llegó allí, también hablamos de una sucesión única de posiciones y velocidades a medida que el meteoro se precipitó a través del espacio hacia la tierra. Sin embargo, en la física cuántica, una vez que observamos algo entramos en el reino enrarecido en el que conocemos algo con un 100% de certeza (ignorando los problemas asociados con la precisión de nuestro equipo, y similares). Pero el pasado -con lo que nos referimos específicamente al pasado "no observado", el tiempo antes de que nosotros, o cualquiera, o cualquier cosa haya llevado a cabo una observación dada- permanece en el ámbito habitual de la incertidumbre cuántica, de las probabilidades. A pesar de que medimos la posición de un electrón como aquí y ahora, hace un momento todo lo que tenía eran probabilidades de estar aquí, o allí, o muy lejos.

Y como hemos visto, no es que el electrón (o cualquier partícula para el caso) realmente se haya ubicado en sólo una de estas posibles posiciones, pero simplemente no sabemos cuál. [2] Más bien, hay un sentido en el que el electrón estaba en todas las posiciones, porque cada una de las posibilidades -cada una de las historias posibles- contribuye a lo que ahora observamos. Recuerde, vimos evidencia de esto en el experimento, descrito en el capítulo 4, en el que los electrones fueron forzados a pasar a través de dos rendijas. La física clásica, que se basa en la creencia común de que los sucesos tienen historias únicas y convencionales, diría que cualquier electrón que llega a la pantalla del detector pasó por la rendija izquierda *o por* la derecha. Pero esta visión del pasado nos llevaría por mal camino: predeciría los resultados ilustrados en la figura 4.3a, que no concuerdan con lo que realmente sucede, como se ilustra en la figura 4.3b. El patrón de interferencia observado sólo puede explicarse invocando una superposición entre algo que pasa por *ambas rendijas*.

La física cuántica proporciona tal explicación, pero al hacerlo cambia drásticamente nuestras historias del pasado, nuestras descripciones de cómo las cosas particulares que observamos llegaron a ser. Según la mecánica cuántica, la onda de probabilidad de cada electrón *pasa a* través de ambas rendijas, y como las partes de la onda que emergen de cada rendija se mezclan, el perfil de probabilidad resultante manifiesta un patrón de interferencia, y por lo tanto las posiciones de aterrizaje de los electrones también lo hacen.

En comparación con la experiencia cotidiana, esta descripción del pasado del electrón en términos de ondas cruzadas de probabilidad es completamente desconocida. Pero, lanzando la precaución al viento, se podría sugerir llevar esta descripción de la mecánica cuántica un paso más allá, llevando a una posibilidad aún más extraña. Tal vez cada electrón individual viaja por sí mismo a través de ambas rendijas en su camino hacia la pantalla, y los datos son el resultado de una interferencia entre estas dos clases de historias. Es decir, es tentador pensar que las ondas que emergen de las dos rendijas representan dos posibles historias para un electrón individual -que pasa por la rendija izquierda o que pasa por la derecha- y como ambas ondas contribuyen a lo que observamos en la pantalla, quizás la mecánica cuántica nos está diciendo que ambas historias potenciales del electrón contribuyen también.

Sorprendentemente, esta extraña y maravillosa idea, obra del premio Nobel Richard Feynman, uno de los físicos más creativos del siglo XX, proporciona una forma perfectamente viable de pensar en la mecánica cuántica. Según Feynman, si hay formas alternativas de lograr un resultado determinado, por ejemplo, un electrón golpea un punto de la pantalla del detector viajando por la rendija izquierda, o golpea el mismo punto de la pantalla pero viajando por la rendija derecha, entonces hay un sentido en el que todas las historias alternativas suceden, y suceden simultáneamente. Feynman mostró que cada una de esas historias contribuiría a la probabilidad de que se realizara su resultado común, y si

esas contribuciones se sumaran correctamente, el resultado coincidiría con la probabilidad total predicha por la mecánica cuántica.

Feynman llamó a esto el enfoque de *suma sobre historias de la mecánica cuántica*; muestra que una onda de probabilidad encarna todos los pasados posibles que podrían haber precedido a una observación dada, e ilustra bien que para tener éxito donde la física clásica fracasó, la mecánica cuántica tuvo que ampliar sustancialmente el marco de la historia.[3]

A Oz

Existe una variación del experimento de la doble rendija en la que la interferencia entre historias alternativas se hace aún más evidente porque las dos rutas hacia la pantalla del detector están más completamente separadas. Es un poco más fácil describir el experimento usando fotones en lugar de electrones, así que empezamos con una fuente de fotones -un láser- y la disparamos hacia lo que se conoce como divisor *de rayos.* Este dispositivo está hecho de un espejo semiplateado, como el que se usa para la vigilancia, que refleja la mitad de la luz que le llega mientras permite que la otra mitad pase a través de él. El único rayo de luz inicial se divide en dos, el rayo izquierdo y el derecho, similar a lo que sucede con un rayo de luz que incide en las dos rendijas en la configuración de doble rendija. Utilizando espejos totalmente reflectantes juiciosamente colocados, como en la figura 7.1, los dos haces se juntan de nuevo más abajo en la ubicación del detector. Tratando la luz como una onda, como en la descripción de Maxwell, esperamos -y, de hecho, encontramos- un patrón de interferencia en la pantalla. La longitud del viaje a todos los puntos de la pantalla, excepto al punto central, es ligeramente diferente para las rutas izquierda y derecha y así, mientras que el rayo izquierdo podría estar alcanzando un pico en un punto dado de la pantalla del detector, el rayo derecho podría estar alcanzando un pico, una depresión o algo intermedio. El detector registra la altura combinada de las dos ondas y por lo tanto tiene el patrón de interferencia característico.

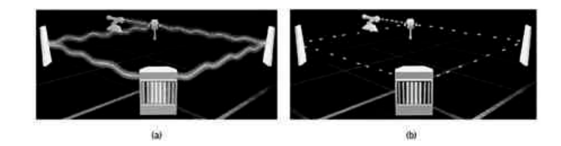


Figura 7.1 a) En un experimento con divisor de rayos, la luz láser se divide en dos rayos que recorren dos caminos separados hasta la pantalla del detector. b) El láser se puede bajar para que dispare fotones individuales; con el tiempo, los puntos de impacto de los fotones crean un patrón de interferencia.

La distinción clásica/cuántica se hace evidente cuando bajamos drásticamente la intensidad del láser para que emita fotones individuales, digamos, uno cada pocos segundos. Cuando un solo fotón golpea el divisor de rayos, la intuición clásica dice que pasará o será reflejado. El razonamiento clásico no permite ni siquiera un indicio de cualquier tipo de interferencia, ya que no hay nada que interfiera: todo lo que tenemos son fotones individuales de partículas que pasan de la fuente al detector, uno por uno, algunos a la izquierda y otros a la derecha. Pero cuando el experimento está hecho, los fotones individuales registrados a lo largo del tiempo, como en la figura 4.4, producen un patrón de interferencia, como en la figura 7.1b. De acuerdo con la física cuántica, la razón es que cada fotón detectado *podría*

haber llegado al detector por la ruta izquierda o por la ruta derecha. Por lo tanto, estamos obligados a combinar estas dos posibles historias para determinar la probabilidad de que un fotón llegue a la pantalla en un punto concreto u otro. Cuando las ondas de probabilidad izquierda y derecha de cada fotón individual se fusionan de esta manera, producen el patrón de probabilidad ondulante de la interferencia de onda.

Y así, a diferencia de Dorothy, que está perpleja cuando el Espantapájaros apunta tanto a la izquierda como a la derecha para dar su dirección a Oz, los datos pueden explicarse perfectamente imaginando que cada fotón toma tanto la ruta izquierda como la derecha hacia el detector.

Prochoice

Aunque hemos descrito la fusión de posibles historias en el contexto de sólo un par de ejemplos específicos, esta forma de pensar sobre la mecánica cuántica es general. Mientras que la física clásica describe el presente como un pasado único, las ondas de probabilidad de la mecánica cuántica amplían el ámbito de la historia: en la formulación de Feynman, el presente observado representa una amalgama -un tipo particular de *promedio*- de todos los pasados posibles compatibles con lo que vemos ahora.

En el caso de los experimentos de doble rendija y de divisor de haz, hay dos maneras de que un electrón o un fotón llegue de la fuente a la pantalla del detector - yendo a la izquierda o a la derecha - y sólo combinando las posibles historias obtenemos una explicación de lo que observamos. Si la barrera tuviera tres rendijas, tendríamos que tener en cuenta tres tipos de historias; con 300 rendijas, tendríamos que incluir las contribuciones de toda la serie de historias posibles resultantes. Llevando esto al límite, si nos imaginamos cortando un enorme número de rendijas -tantas, de hecho, que la barrera desaparece efectivamente- la física cuántica dice que cada electrón atravesaría entonces *todos los caminos* posibles en su camino hacia un punto particular de la pantalla, y sólo combinando las probabilidades asociadas con cada una de esas historias podríamos explicar los datos resultantes. Eso puede sonar extraño. (Es extraño.) Pero este extraño tratamiento de los tiempos pasados explica los datos de la Figura 4.4, la Figura 7.1b, y todos los demás experimentos relacionados con el micromundo.

Te preguntarás cómo de literalmente deberías tomar la suma sobre la descripción de las historias. ¿Un electrón que golpea la pantalla del detector *realmente llega* allí viajando por todas las rutas posibles, o la prescripción de Feynman es simplemente un ingenio matemático inteligente que obtiene la respuesta correcta? Esta es una de las preguntas clave para evaluar la verdadera naturaleza de la realidad cuántica, así que me gustaría poder darle una respuesta definitiva. Pero no puedo. Los físicos a menudo encuentran extremadamente útil imaginar un vasto conjunto de historias combinadas; uso este cuadro en mi propia investigación con tanta frecuencia que ciertamente se siente real. Pero eso no es lo mismo que decir que *es* real. El punto es que los cálculos cuánticos nos dicen inequívocamente la probabilidad de que un electrón aterrice en uno u otro punto de la pantalla, y estas predicciones concuerdan con los datos, de inmediato. En lo que respecta a la verificación de la teoría y a la utilidad de las predicciones, la

historia que contamos de cómo el electrón llegó a ese punto de la pantalla es de poca relevancia.

Pero seguramente, usted continuaría presionando, podemos resolver la cuestión de lo que realmente sucede cambiando el montaje experimental para que también podamos ver la supuesta mezcla borrosa de posibles pasados fusionándose en el presente observado. Es una buena sugerencia, pero ya sabemos que tiene que haber un problema. En el capítulo 4, aprendimos que las ondas de probabilidad no son directamente observables; ya que las historias de fusión de Feynman no son más que una forma particular de pensar en las ondas de probabilidad, ellas también deben evadir la observación directa. Y lo hacen. Las observaciones no pueden separar las historias individuales; más bien, las observaciones reflejan *promedios* de todas las historias posibles. Por lo tanto, si se cambia la configuración para observar los electrones en vuelo, se verá cada electrón pasar por el detector adicional en un lugar u otro; nunca se verá ninguna historia múltiple borrosa. Cuando se utiliza la mecánica cuántica para explicar *por qué se vio* el electrón en un lugar u otro, la respuesta implicará promediar todas las historias posibles que podrían haber llevado a esa observación intermedia. Pero la observación en sí misma sólo tiene acceso a las historias que ya se han fusionado. Al observar el electrón en vuelo, sólo se ha hecho retroceder la noción de lo que se quiere decir con una historia. La mecánica cuántica es muy eficiente: explica lo que se ve pero impide ver la explicación.

Podría preguntarse además: ¿Por qué, entonces, la física clásica -física del sentido común- que describe el movimiento en términos de historias y trayectorias únicas, es relevante para el universo? ¿Por qué funciona tan bien para explicar y predecir el movimiento de todo, desde las pelotas de béisbol hasta los planetas y los cometas? ¿Cómo es que no hay evidencia en la vida cotidiana de la extraña forma en que el pasado aparentemente se desarrolla en el presente? La razón, discutida brevemente en el capítulo 4 y que será elaborada en breve con mayor precisión, es que las bolas de béisbol, los planetas y los cometas son comparativamente grandes, al menos cuando se comparan con partículas como los electrones. Y en la mecánica cuántica, cuanto más grande es algo, más sesgada se vuelve la media: Todas las trayectorias posibles *contribuyen* al movimiento de una pelota de béisbol en vuelo, pero la trayectoria habitual, la única trayectoria predicha por las leyes de Newton, contribuye *mucho* más que todas las demás trayectorias combinadas. Para los objetos grandes, resulta que las trayectorias clásicas son, en gran medida, la contribución dominante al proceso de promediación y por lo tanto son las que conocemos. Pero cuando los objetos son pequeños, como los electrones, los quarks y los fotones, muchas historias diferentes contribuyen aproximadamente al mismo nivel y, por lo tanto, todas juegan un papel importante en el proceso de promediación.

Finalmente podría preguntarse: ¿Qué tiene de especial el acto de observar o medir que puede obligar a todas las historias posibles a apostar, fusionarse y

producir un único resultado? ¿Cómo es que nuestro acto de observar de alguna manera le dice a una partícula que es hora de contar las historias, promediarlas, y comprometerse a un resultado definitivo? ¿Por qué los humanos y los equipos que fabricamos tenemos este poder especial? ¿Es especial? ¿O podría el acto humano de observación encajar en un marco más amplio de influencia ambiental que muestra, hablando mecánicamente cuántico, que no somos tan especiales después de todo? Nos ocuparemos de estos desconcertantes y controvertidos temas en la última mitad de este capítulo, ya que no sólo son fundamentales para la naturaleza de la realidad cuántica, sino que proporcionan un importante marco para pensar en la mecánica cuántica y la flecha del tiempo.

El cálculo de los promedios de la mecánica cuántica requiere una importante capacitación técnica. Y comprender plenamente cómo, cuándo y dónde se cuentan los promedios requiere conceptos que los físicos aún están trabajando duro para formular. Pero una lección clave se puede enunciar de forma sencilla: la mecánica cuántica es la última arena de la elección: cada posible "elección" que algo pueda hacer para ir de aquí a allá está incluida en la probabilidad de la mecánica cuántica asociada con un posible resultado u otro.

La física clásica y la cuántica tratan el pasado de maneras muy diferentes.

Historia de la poda

Está totalmente en desacuerdo con nuestra educación clásica imaginar un objeto indivisible, un electrón o un fotón, moviéndose simultáneamente a lo largo de más de un camino. Incluso aquellos de nosotros con el mayor autocontrol tendrían dificultades para resistir la tentación de echar un vistazo: a medida que el electrón o el fotón pasa a través de la pantalla de doble rendija o el divisor de haz, ¿por qué no echar un vistazo rápido para ver qué camino sigue *realmente* en su camino hacia el detector? En el experimento de la doble rendija, ¿por qué no poner pequeños detectores delante de cada rendija para que le digan si el electrón pasó por una abertura, por la otra o por ambas (mientras que aún así permite que el electrón siga hacia el detector principal)? En el experimento del divisor de haz, ¿por qué no poner, en cada camino que sale del divisor de haz, un pequeño detector que le dirá si el fotón tomó la ruta izquierda, la ruta derecha, o ambas rutas (de nuevo, mientras se permite al fotón seguir adelante hacia el detector)?

La respuesta es que *puedes insertar* estos detectores adicionales, pero si lo haces, encontrarás dos cosas. Primero, cada electrón y cada fotón siempre se encontrará que pasa por uno y sólo uno de los detectores; es decir, puedes determinar qué camino sigue cada electrón o fotón, y encontrarás que siempre va en una dirección o en la otra, no en ambas. En segundo lugar, también encontrarás que los datos resultantes registrados por los principales detectores han cambiado. En lugar de obtener los patrones de interferencia de las figuras

4.3b y 7.1b, se obtienen los resultados esperados de la física clásica, como en la figura 4.3a. Al introducir nuevos elementos -los nuevos detectores- se han cambiado los experimentos sin querer. Y el cambio es tal que se evita la paradoja que estaba *a punto de revelar*: que ahora se sabe qué camino tomó cada partícula, de modo que ¿cómo podría haber alguna interferencia con otro camino que la partícula demostrablemente no tomó? La razón se desprende inmediatamente de la última sección. Su nueva observación señala las historias que podrían haber precedido a lo que su nueva observación reveló. Y como esta observación determinó el camino que tomó el fotón, consideramos *sólo aquellas historias que atraviesan este camino, eliminando así la posibilidad de interferencia.*

A Niels Bohr le gustaba resumir tales cosas usando su *principio de complementariedad.* Cada electrón, cada fotón, cada *cosa*, de hecho, tiene aspectos tanto de ondas como de partículas. Son características complementarias. Pensar puramente en el marco convencional de las partículas -en el que las partículas se mueven a lo largo de trayectorias únicas y singulares-es incompleto, porque no tiene los aspectos ondulatorios que demuestran los patrones de interferencia. [16] Pensar puramente en el marco ondulatorio es incompleto, porque no tiene en cuenta los aspectos ondulatorios demostrados por las mediciones que encuentran partículas localizadas que pueden ser, por ejemplo, registradas por un solo punto en una pantalla. (Véase la figura 4.4.) Una imagen completa requiere que se tengan en cuenta ambos aspectos complementarios. En cualquier situación dada se puede forzar a que una característica sea más prominente en virtud de la forma en que se elija interactuar. Si se permite que los electrones viajen de la fuente a la pantalla sin ser observados, sus cualidades ondulatorias pueden emerger, produciendo interferencias. Pero si observas el electrón en camino, sabes qué camino tomó, así que no podrías explicar la interferencia. La realidad viene al rescate. Su observación reduce las ramas de la historia cuántica. Obliga al electrón a comportarse como una partícula; como las partículas van en un sentido *u* otro, no se forma ningún patrón de interferencia, así que no hay nada que explicar.

La naturaleza hace cosas raras. Vive al límite. Pero es cuidadosa al moverse y tejer desde el golpe fatal de la paradoja lógica.

La contingencia de la historia

Estos experimentos son notables. Proporcionan una simple pero poderosa prueba de que nuestro mundo está gobernado por las leyes cuánticas encontradas por los físicos en el siglo XX, y no por las leyes clásicas encontradas por las leyes de Newton, Maxwell y Einstein que ahora reconocemos como poderosas y perspicaces aproximaciones para describir los eventos a escalas suficientemente grandes. Ya hemos visto que las leyes cuánticas desafían las nociones

convencionales de lo que ocurrió en el pasado, esos eventos no observados que son responsables de lo que ahora vemos. Algunas simples variaciones de estos experimentos llevan este desafío a nuestra noción intuitiva de cómo se desarrollan las cosas en el tiempo a un nivel aún mayor, aún más sorprendente.

La primera variación se llama el experimento de *elección diferida* y fue sugerido en 1980 por el eminente físico John Wheeler. El experimento se topa con una inquietante pregunta que suena extraña: ¿Depende el pasado del futuro? Obsérvese que esto no es lo mismo que preguntar si podemos volver atrás y cambiar el pasado (un tema que tratamos en el capítulo 15). En cambio, el experimento de Wheeler, que se ha llevado a cabo y analizado con considerable detalle, expone una provocadora interacción entre los acontecimientos que imaginamos que han tenido lugar en el pasado, incluso en el pasado lejano, y los que vemos que tienen lugar ahora mismo.

Para tener una idea de la física, imagínese que es un coleccionista de arte y que el Sr. Smithers, presidente de la nueva Sociedad de Arte y Embellecimiento de Springfield, viene a ver varias obras que ha puesto a la venta. Usted sabe, sin embargo, que su verdadero interés está en *The Full Monty,* una pintura de su colección que nunca se sintió muy en forma, pero que le fue dejada por su querido tío abuelo Monty Burns, por lo que decidir si la vende es una lucha emocional. Después de que el Sr. Smithers llega, usted habla de su colección, las subastas recientes, la exposición actual en el Metropolitan; sorprendentemente, usted aprende que, hace años, Smithers fue el mejor ayudante de su tío abuelo. Al final de la conversación decides que estás dispuesto a separarte de *The Full Monty:* Hay tantas otras obras que quieres, y debes ejercer moderación o tu colección no tendrá enfoque. En el mundo del coleccionismo de arte, siempre te has dicho a ti mismo, a veces más es menos.

Al reflexionar sobre esta decisión, en retrospectiva parece que ya había decidido vender antes de que el Sr. Smithers llegara. Aunque siempre ha tenido cierto afecto por *The Full Monty,* ha sido cauteloso de acumular una colección extensa y el realismo erótico-nuclear de finales del siglo XX es un área intimidante para todos, excepto para el coleccionista más experimentado. Aunque recuerde que antes de la llegada de su visitante había estado pensando que no sabía qué hacer, desde su actual punto de vista parece que sí lo sabía. No es que los acontecimientos futuros hayan afectado al pasado, pero su agradable encuentro con el Sr. Smithers y su posterior declaración de su voluntad de vender han iluminado el pasado de una manera que hace que se definan cosas particulares que parecían indecisas en ese momento. Es como si la reunión y su declaración le ayudaran a aceptar una decisión que ya estaba tomada, una que estaba esperando ser llevada a la luz del día. El futuro le ha ayudado a contar una historia más completa de lo que estaba pasando en el pasado.

Por supuesto, en este ejemplo, los eventos futuros están afectando sólo a su percepción o interpretación del pasado, por lo que los eventos no son ni desconcertantes ni sorprendentes. Pero el experimento de elección retardada de Wheeler transporta esta interacción psicológica entre el futuro y el pasado al reino cuántico, donde se vuelve a la vez preciso y sorprendente. Comenzamos con el experimento de la figura 7.1a, modificado por el giro del láser para que dispare un fotón a la vez, como en la figura 7.1b, y también por la colocación de un nuevo detector de fotones junto al divisor de rayos. Si el nuevo detector se apaga (ver Figura 7.2b), entonces volvemos a la configuración original del experimento y los fotones generan un patrón de interferencia en la pantalla fotográfica. Pero si el nuevo detector se enciende (Figura 7.2a), nos dice qué camino recorrió cada fotón: si detecta un fotón, entonces el fotón tomó ese camino; si no detecta un fotón, entonces el fotón tomó el otro camino. Esta información de "qué camino", como se llama, obliga al fotón a actuar como una partícula, por lo que el patrón de interferencia ondulatoria ya no se genera.

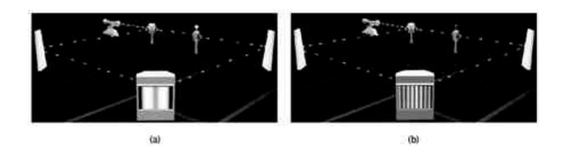


Figura 7.2 a) Al activar los detectores de "qué camino", estropeamos el patrón de interferencia. b) Cuando se apagan los nuevos detectores, volvemos a la situación de la figura 7.1 y el patrón de interferencia se acumula.

Ahora cambiemos las cosas, à la Wheeler, moviendo el nuevo detector de fotones a lo largo de una de las dos vías. En principio, los caminos pueden ser tan largos como se quiera, así que el nuevo detector puede estar a una distancia considerable del divisor de rayos. Nuevamente, si este nuevo detector de fotones se apaga, estamos en la situación habitual y los fotones llenan un patrón de interferencia en la pantalla. Si se enciende, proporciona información de qué camino y por lo tanto excluye la existencia de un patrón de interferencia.

La nueva rareza proviene del hecho de que la medición de qué camino tiene lugar mucho *después de que* el fotón haya tenido que "decidir" en el divisor de rayos si actúa como una onda y viaja por ambos caminos o si actúa como una partícula y viaja sólo por uno. Cuando el fotón pasa por el divisor de haz, no puede "saber" si el nuevo detector está encendido o apagado; de hecho, el experimento puede arreglarse de manera que el interruptor de encendido y apagado del detector se ponga *después de que el fotón* haya pasado por el divisor. Para estar preparado para la posibilidad de que el detector esté apagado, es mejor que la onda cuántica del fotón se divida y recorra ambos caminos, de modo que una amalgama de los dos pueda producir el patrón de interferencia observado. Pero si el nuevo detector resulta haber estado encendido, o si se encendió después de que el fotón se

despejara completamente del divisor, parecería que el fotón tiene una crisis de identidad: al pasar por el divisor, ya se había comprometido con su carácter ondulatorio al viajar por ambos caminos, pero ahora, en algún momento después de hacer esta elección, "se da cuenta" de que tiene que bajar directamente del lado de ser una partícula que viaja por un solo y único camino.

De alguna manera, sin embargo, los fotones siempre lo hacen bien. Siempre que el detector está encendido de nuevo, incluso si la elección de encenderlo se retrasa hasta mucho después de que un fotón dado haya pasado por el divisor de rayos, el fotón actúa totalmente como una partícula. Se encuentra en una y sólo una ruta hacia la pantalla (si pusiéramos detectores de fotones en ambas rutas, cada fotón emitido por el láser sería detectado por uno u otro detector, nunca por ambos); los datos resultantes no muestran ningún patrón de interferencia. Siempre que el nuevo detector se apaga, incluso si esta decisión se toma después de que cada fotón haya pasado por el divisor, los fotones actúan totalmente como una onda, produciendo el famoso patrón de interferencia que muestra que han viajado por ambos caminos. Es como si los fotones ajustaran su comportamiento en el pasado de acuerdo con la futura elección de si el nuevo detector está encendido; es como si los fotones tuvieran una "premonición" de la situación experimental que encontrarán más adelante, y actuaran en consecuencia. Es como si una historia consistente y definida se manifestara sólo después de que el futuro al que conduce se haya establecido completamente.[4]

Hay una similitud con su experiencia al decidir vender *The Full Monty.* Antes de reunirse con el Sr. Smithers, estaba en un ambiguo, indeciso, confuso y mixto estado de estar dispuesto y no dispuesto a vender el cuadro. Pero hablar juntos sobre el mundo del arte y conocer el afecto de Smithers por su tío abuelo le hizo sentirse cada vez más cómodo con la idea de vender. La conversación condujo a una decisión firme, que a su vez permitió que la historia de la decisión se cristalizara a partir de la incertidumbre anterior. En retrospectiva, parecía como si la decisión se hubiera tomado realmente todo el tiempo. Pero si no se hubiera llevado tan bien con el Sr. Smithers, si no le hubiera dado la confianza de que *The Full Monty* estaría en manos confiables, bien podría haber decidido no vender. Y la historia del pasado que podría contar en esta situación podría fácilmente implicar un reconocimiento de que en realidad había decidido hace mucho tiempo *no* vender, que por muy sensato que fuera vender el cuadro, en el fondo siempre ha sabido que la conexión sentimental era demasiado fuerte para dejarlo ir. El pasado real, por supuesto, no cambió ni un poco. Sin embargo, una experiencia diferente ahora te llevaría a describir una historia diferente.

En el ámbito psicológico, reescribir o reinterpretar el pasado es algo común; nuestra historia del pasado a menudo está informada por nuestras experiencias en el presente. Pero en la arena de la física, una arena que normalmente consideramos objetiva y puesta en piedra, una contingencia futura de la historia hace que la cabeza dé vueltas. Para hacer que el giro sea aún más severo,

Wheeler imagina una versión cósmica del experimento de elección retardada en el que la fuente de luz no es un láser de laboratorio sino, en cambio, un poderoso quásar en el espacio profundo. El divisor de rayos tampoco es una variedad de laboratorio, sino que es una galaxia intermedia cuya atracción gravitatoria puede actuar como una lente que enfoca los fotones que pasan y los dirige hacia la tierra, como en la figura 7.3. Aunque hasta ahora nadie ha realizado este experimento, en principio, si se recogen suficientes fotones del cuásar, deberían rellenar un patrón de interferencia en una placa fotográfica de larga exposición, al igual que en el experimento del divisor de rayos de laboratorio. Pero si pusiéramos otro detector de fotones justo al final de una u otra ruta, proporcionaría información de cuál ruta para los fotones, destruyendo así el patrón de interferencia.

Lo que llama la atención de esta versión es que, desde nuestra perspectiva, los fotones podrían haber estado viajando durante muchos miles de millones de años. Su decisión de ir en una dirección alrededor de la galaxia, como una partícula, o en ambas direcciones, como una onda, parecería haber sido tomada mucho antes de que el detector, cualquiera de nosotros, o incluso la Tierra existiera. Sin embargo, miles de millones de años más tarde, el detector fue construido, instalado a lo largo de uno de los caminos que los fotones toman para llegar a la tierra, y se encendió. Y estos actos recientes de alguna manera aseguran que los fotones considerados actúen como partículas. Actúan como si hubieran estado viajando precisamente por un camino u otro en su largo viaje a la Tierra. Pero si, después de unos minutos, apagamos el detector, los fotones que posteriormente llegan a la placa fotográfica empiezan a acumular un patrón de interferencia, indicando que durante miles de millones de años han estado viajando en tándem con sus compañeros fantasmas, tomando caminos opuestos alrededor de la galaxia.

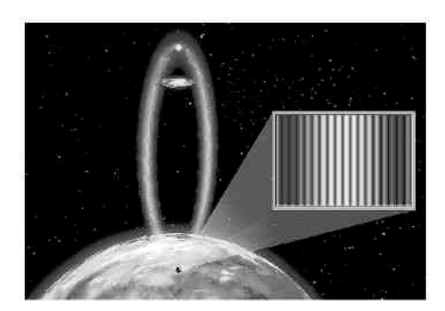


Figura 7.3 La luz de un cuásar distante, dividida y enfocada por una galaxia intermedia, producirá, en principio, un patrón de interferencia. Si se activara un detector adicional, que permite determinar el trayecto recorrido por cada fotón, los fotones resultantes ya no llenarían un patrón de interferencia.

¿Ha tenido nuestro encendido o apagado el detector en el siglo XXI un efecto en el movimiento de los fotones unos miles de millones de años antes? Ciertamente no. La mecánica cuántica no niega que el pasado ha sucedido, y sucedió

completamente. La tensión surge simplemente porque el concepto de *pasado según* el cuántico es diferente del concepto de *pasado según la* intuición clásica. Nuestra educación clásica nos hace anhelar decir que un fotón dado *hizo* esto o aquello. Pero en un mundo cuántico, nuestro mundo, este razonamiento impone al fotón una realidad demasiado restrictiva. Como hemos visto, en la mecánica cuántica la norma es una realidad indeterminada, borrosa, híbrida, que consiste en muchas hebras, que sólo se cristaliza en una realidad más familiar y definida cuando se realiza una observación adecuada. No es que el fotón, hace miles de millones de años, decidiera dar una vuelta a la galaxia o a la otra, o a ambas. En cambio, durante miles de millones de años ha estado en la norma cuántica, un híbrido de las posibilidades.

El acto de observación vincula esta realidad cuántica desconocida con la experiencia clásica cotidiana. Las observaciones que hacemos hoy hacen que una de las ramas de la historia cuántica gane prominencia en nuestro recuento del pasado. En este sentido, entonces, aunque la evolución cuántica desde el pasado hasta ahora no se ve afectada por nada de lo que hacemos ahora, la historia que contamos del pasado puede llevar la impronta de las acciones de hoy. Si insertamos detectores de fotones a lo largo de los dos caminos que la luz lleva a una pantalla, entonces nuestra historia del pasado incluirá una descripción del camino que cada fotón tomó; al insertar los detectores de fotones, nos aseguramos de que la información de qué camino es un detalle esencial y definitivo de nuestra historia. Pero, si no insertamos los detectores de fotones, nuestra historia del pasado será, por necesidad, diferente. Sin los detectores de fotones, no podemos contar nada sobre qué camino tomaron los fotones; sin los detectores de fotones, los detalles de qué camino son fundamentalmente inasequibles. Ambas historias son válidas. Ambas historias son interesantes. Sólo describen situaciones diferentes.

Por lo tanto, una observación de hoy puede ayudar a completar la historia que contamos de un proceso que comenzó ayer, o el día anterior, o tal vez mil millones de años antes. Una observación de hoy puede delinear los tipos de detalles que podemos y debemos incluir en el recuento de hoy del pasado.

Borrando el pasado

Es esencial señalar que en estos experimentos el pasado no se altera de ninguna manera por las acciones de hoy, y que ninguna modificación inteligente de los experimentos logrará ese resbaladizo objetivo. Esto plantea la pregunta: Si no puedes cambiar algo que ya ha ocurrido, ¿puedes hacer lo siguiente mejor y borrar su *impacto* en el presente? En un grado u otro, a veces esta fantasía puede ser realizada. Un jugador de béisbol que, con dos outs en la parte inferior de la novena entrada, deja caer una bola voladora de rutina, permitiendo al equipo

contrario cerrar dentro de una carrera, puede deshacer el impacto de su error con una espectacular captura en picada de la bola golpeada por el siguiente bateador. Y, por supuesto, tal ejemplo no es el más mínimo misterio. Sólo cuando un acontecimiento del pasado parece excluir definitivamente que ocurra otro en el futuro (ya que la bola lanzada al aire definitivamente excluyó un juego perfecto) pensaríamos que hay algo erróneo si posteriormente se nos dijera que el acontecimiento excluido ha ocurrido realmente. El borrador cuántico*, sugerido por primera vez* en 1982 por Marlan Scully y Kai Drühl, insinúa este tipo de extrañeza en la mecánica cuántica.

Una versión simple del experimento del borrador cuántico hace uso de la configuración de doble rendija, modificada de la siguiente manera. Se coloca un dispositivo de marcado delante de cada rendija; marca cualquier fotón que pasa, de modo que cuando el fotón se examina más tarde, se puede saber por qué rendija pasó. La cuestión de cómo se puede colocar una marca en un fotón -como se puede hacer el equivalente de colocar una "L" en un fotón que pasa por la rendija izquierda y una "R" en un fotón que pasa por la rendija derecha- es buena, pero los detalles no son particularmente importantes. A grandes rasgos, el proceso se basa en el uso de un dispositivo que permite a un fotón pasar libremente por una rendija pero que obliga a su eje de giro a apuntar en una dirección determinada. Si los dispositivos situados delante de las rendijas izquierda y derecha manipulan los giros de los fotones de maneras específicas pero distintas, entonces una pantalla detectora más refinada que no sólo registra un punto en el lugar de impacto del fotón, sino que también mantiene un registro de la orientación del espín del fotón, revelará por qué rendija pasó un fotón determinado en su camino hacia el detector.

Cuando se lleva a cabo este experimento de doble rendija con etiquetado, los fotones no forman un patrón de interferencia, como en la figura 7.4a. A estas alturas, la explicación debería ser familiar: los nuevos dispositivos de marcado permiten recoger información sobre qué camino se ha seguido y qué información sobre qué camino señala una historia u otra; los datos muestran que cualquier fotón dado pasó por la rendija izquierda o por la derecha. Y sin la combinación de las trayectorias de la rendija izquierda y la derecha, no hay ondas de probabilidad superpuestas, por lo que no se genera un patrón de interferencia.

Esta es la idea de Scully y Drühl. ¿Qué tal si, justo antes de que el fotón llegue a la pantalla de detección, eliminas la posibilidad de determinar por qué ranura pasó borrando la marca impresa por el dispositivo de marcado? Sin los medios, incluso en principio, para extraer la información de la ruta de qué del fotón detectado, ¿volverán a entrar en juego ambas clases de historias, causando que el patrón de interferencia vuelva a aparecer? Obsérvese que este tipo de "deshacer" el pasado caería mucho más en la categoría de chocante que la captura en picado del jugador en la novena entrada. Cuando se encienden los dispositivos de marcación, imaginamos que el fotón actúa obedientemente como una partícula,

pasando por la rendija izquierda *o* la derecha. Si de alguna manera, justo antes de que llegue a la pantalla, borramos la marca de la rendija que lleva, parece demasiado tarde para permitir que se forme un patrón de interferencia. Para la interferencia, necesitamos que el fotón actúe como una onda. Debe pasar a través de ambas rendijas para que pueda cruzarse consigo mismo en el camino a la pantalla del detector. Pero nuestra marcación inicial del fotón parece asegurar que actúa como una partícula y viaja a través de la rendija izquierda o derecha, evitando que ocurra la interferencia.

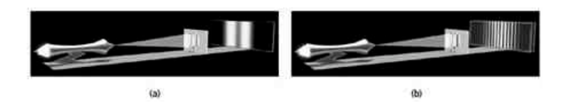


Figura 7.4 En el experimento del borrador cuántico, el equipo colocado delante de las dos rendijas marca los fotones para que el examen posterior pueda revelar por qué rendija pasó cada fotón. En a) vemos que esta información de qué camino estropea el patrón de interferencia. En b) se introduce un dispositivo que borra la marca de los fotones justo delante de la pantalla del detector. Debido a que la información de "Which path" se elimina, el patrón de interferencia reaparece.

En un experimento llevado a cabo por Raymond Chiao, Paul Kwiat y Aephraim Steinberg, la configuración fue, esquemáticamente, como en la figura 7.4, con un nuevo dispositivo de borrado insertado justo delante de la pantalla de detección. Una vez más, los detalles no son esenciales, pero en pocas palabras, el borrador funciona asegurando que, independientemente de que entre un fotón de la rendija izquierda o de la derecha, su espín se manipula para que apunte en una misma dirección fija. Por lo tanto, el examen posterior de su espín no da información sobre la rendija por la que ha pasado, por lo que la marca de qué camino se ha borrado. Sorprendentemente, los fotones detectados por la pantalla después de este borrado producen un patrón de interferencia. Cuando el borrador se inserta justo delante de la pantalla del detector, deshace -borrando- el efecto de marcar los fotones muy atrás cuando se acercaron a las rendijas. Como en el experimento de elección retardada, en principio este tipo de borrado podría ocurrir miles de millones de años después de la influencia que está frustrando, en efecto deshaciendo el pasado, incluso deshaciendo el pasado antiguo.

¿Cómo vamos a darle sentido a esto? Bueno, tened en cuenta que los datos se ajustan perfectamente a la predicción teórica de la mecánica cuántica. Scully y Drühl propusieron este experimento porque sus cálculos de mecánica cuántica los convencieron de que funcionaría. Y así es. Así que, como es habitual en la mecánica cuántica, el rompecabezas no enfrenta a la teoría con el experimento. Enfrenta a la teoría, confirmada por el experimento, con nuestro sentido intuitivo del tiempo y la realidad. Para aliviar la tensión, observe que si colocara un detector *de fotones delante* de cada rendija, la lectura del detector establecería con certeza si el fotón pasó por la rendija izquierda o por la derecha, y no habría forma de

borrar esa información definitiva, no habría forma de recuperar un patrón de interferencia. Pero los dispositivos de marcación son diferentes porque sólo proporcionan el potencial para qué - información de trayectoria a determinar - y las potencialidades son sólo el tipo de cosas que pueden ser borradas. Un dispositivo de marcado modifica un fotón que pasa de tal forma que, en términos generales, sigue recorriendo ambos caminos, pero la parte izquierda de su onda de probabilidad se difumina con respecto a la derecha, o la parte derecha de su onda de probabilidad se difumina con respecto a la izquierda. A su vez, la secuencia ordenada de picos y valles que normalmente emergerían de cada rendija -como en la figura 4.2b- también se difumina, por lo que no se forma ningún patrón de interferencia en la pantalla del detector. Sin embargo, la realización crucial es que tanto la onda izquierda como la derecha siguen presentes. El borrador funciona porque reenfoca las ondas. Como un par de gafas, compensa la borrosidad, vuelve a enfocar ambas ondas y permite que se combinen de nuevo en un patrón de interferencia. Es como si después de que los dispositivos de marcado cumplen su tarea, el patrón de interferencia desaparece de la vista pero pacientemente espera a que alguien o algo lo resucite.

Esa explicación puede hacer que el borrador cuántico sea un poco menos misterioso, pero aquí está el final, una impresionante variación del experimento del borrador cuántico que desafía aún más las nociones convencionales de espacio y tiempo.

Formando el pasado17

Este experimento, el borrador cuántico de elección tardía, también fue propuesto por Scully y Drühl. Comienza con el experimento del divisor de rayos de la figura 7.1, modificado con la inserción de dos llamados convertidores descendentes, uno en cada vía. Los convertidores descendentes son dispositivos que toman un fotón como entrada y producen dos fotones como salida, cada uno con la mitad de la energía ("convertida") del original. Uno de los dos fotones (llamado fotón de *señal*) se dirige a lo largo del camino que el original habría seguido hacia la pantalla del detector. El otro fotón producido por el conversor descendente (llamado el fotón *ocioso*) se envía en una dirección totalmente diferente, como en la figura 7.5a. En cada ejecución del experimento, podemos determinar qué camino toma un fotón de señal hacia la pantalla observando qué conversor descendente escupe al compañero fotón ocioso. Y una vez más, la capacidad de recoger qué camino - información sobre los fotones de señal- aunque es totalmente indirecta, ya que no estamos interactuando con ningún fotón de señal en absoluto, tiene el efecto de impedir que se forme un patrón de interferencia.

Ahora la parte más extraña. ¿Y si manipulamos el experimento para que sea imposible determinar de qué convertidor descendente surgió un determinado fotón

inactivo? ¿Y si, es decir, borramos la información de qué camino encarnan los fotones inactivos? Bueno, algo sorprendente sucede: aunque no hayamos hecho nada directamente a los fotones de señal, al borrar la información de "qué camino" que llevan sus compañeros ociosos podemos recuperar un patrón de interferencia de los fotones de señal. Déjenme mostrarles cómo funciona esto porque es realmente notable.

Echa un vistazo a la figura 7.5b, que encarna todas las ideas esenciales. Pero no se deje intimidar. Es más simple de lo que parece, y ahora vamos a ir a través de ella en pasos manejables. La configuración de la figura 7.5b difiere de la de la figura 7.5a en cuanto a cómo detectamos los fotones inactivos después de ser emitidos. En la figura 7.5a, los detectamos directamente, y así pudimos determinar inmediatamente desde qué convertidor descendente se produjo cada uno, es decir, qué camino tomó un fotón de señal dado. En el nuevo experimento, cada fotón ocioso se envía a través de un laberinto, lo que compromete nuestra capacidad para hacer tal determinación. Por ejemplo, imaginemos que un fotón ocioso es emitido por el conversor descendente llamado "L". En lugar de entrar inmediatamente en un detector (como en la figura 7.5a), este fotón se envía a un divisor de haz (etiquetado como "a"), y por lo tanto tiene un 50 por ciento de posibilidades de avanzar por el camino etiquetado como "A", y un 50 por ciento de posibilidades de avanzar por el camino etiquetado como "B". Si se dirige por el camino A, entrará en un detector de fotones (etiquetado "1"), y su llegada será debidamente registrada. Pero si el fotón ocioso se dirige a lo largo del camino B, estará sujeto a más engaños. Será dirigido a otro divisor de rayos (etiquetado "c") y así tendrá un 50 por ciento de posibilidades de dirigirse hacia adelante por el camino E hasta el detector etiquetado "2", y un 50 por ciento de posibilidades de dirigirse hacia adelante por el camino F hasta el detector etiquetado "3". Ahora, quédese conmigo, ya que hay un punto en todo esto: el mismo razonamiento exacto, cuando se aplica a un fotón ocioso emitido desde el otro convertidor descendente, etiquetado como "R", nos dice que si el ocioso se dirige por el camino D será registrado por el detector 4, pero si se dirige por el camino C será detectado por el detector 3 o el detector 2, dependiendo del camino que siga después de pasar por el divisor de haz c.

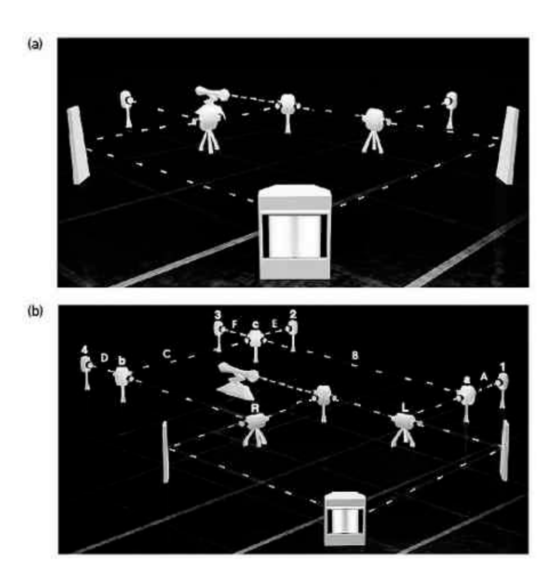


Figura 7.5 a) Un experimento con divisor de haz, aumentado por convertidores descendentes, no produce un patrón de interferencia, ya que los fotones ociosos producen información de qué camino. b) Si los fotones en reposo no se detectan directamente, sino que se envían a través del laberinto representado, entonces se puede extraer un patrón de interferencia de los datos. Los fotones ociosos que son detectados por los detectores 2 ó 3 no proporcionan información de qué camino y, por lo tanto, sus fotones de señal rellenan un patrón de interferencia.

Ahora por qué hemos añadido toda esta complicación. Observe que si un fotón ocioso es detectado por el detector 1, aprendemos que el fotón de señal correspondiente tomó el camino izquierdo, ya que no hay manera de que un ocioso que fue emitido desde el convertidor descendente R encuentre su camino hacia este detector. De manera similar, si un fotón ocioso es detectado por el detector 4, aprendemos que su compañero fotón de señal tomó el camino correcto. Pero si un fotón ocioso termina en el detector 2, no tenemos ni idea de qué camino tomó su compañero fotón de señal, ya que hay una posibilidad igual de que haya sido emitido por el conversor descendente L y haya seguido el camino B-E, o que haya sido emitido por el conversor descendente R y haya seguido el camino C-E. De manera similar, si un holgazán es detectado por el detector 3, podría haber sido emitido por el conversor descendente L y haber seguido el camino B-F, o por el conversor descendente R y seguido el camino C-F. Por lo tanto, para los fotones de señal cuyas holgazanas son detectadas *1 o 4, tenemos información de qué camino, pero para aquellos cuyas holgazanas son detectadas por el detector 2 o 3, la información de qué camino se borra.*

¿Este borrado de parte de la información de qué camino, aunque no hayamos hecho *nada directamente* a los fotones de la señal, significa que se recuperan los efectos de interferencia? De hecho lo hace, pero sólo para aquellos fotones de señal cuyos holgazanes terminan en el detector 2 o en el detector 3. A saber, la

totalidad de las posiciones de impacto de los fotones de señal en la pantalla se parecerá a los datos de la figura 7.5a, sin mostrar *el más mínimo indicio de un patrón de interferencia,* como es característico de los fotones que han recorrido un camino *u* otro. Pero si nos centramos en un *subconjunto* de los puntos de datos -por ejemplo, aquellos fotones de señal cuyos holgazanes entraron en el detector 2-, ¡entonces ese subconjunto de puntos *llenará* un patrón de interferencia! ¡Estos fotones de señal, cuyos holgazanes no proporcionaron por casualidad ninguna información de qué camino, actúan como si hubieran viajado por ambos caminos! Si conectáramos el equipo de manera que la pantalla mostrara un punto rojo para la posición de cada fotón de señal cuyo holgazán fue detectado por el detector 2, y un punto verde para todos los demás, alguien que es daltónico no vería ningún patrón de interferencia, pero todos los demás verían que los puntos rojos estaban dispuestos con bandas brillantes y oscuras, un patrón de interferencia. Lo mismo ocurre con el detector 3 en lugar del 2. Pero no habría tal patrón de interferencia si seleccionamos fotones de señal cuyos holgazanes terminan en el detector 1 o en el 4, ya que estos son los holgazanes que dan información de "qué camino" sobre sus parejas.

Estos resultados -que han sido confirmados por el experimento [5-] son deslumbrantes: al incluir los convertidores descendentes que tienen el potencial de proporcionar información de qué camino, perdemos el patrón de interferencia, como en la figura 7.5a. Y sin interferencia, naturalmente concluiríamos que cada fotón fue por el camino izquierdo o por el camino derecho. Pero ahora aprendemos que esta sería una conclusión precipitada. Eliminando cuidadosamente la información potencial de qué camino llevan algunos de los holgazanes, podemos persuadir a los datos para que den un patrón de interferencia, indicando que algunos de los fotones realmente tomaron ambos caminos.

Obsérvese también, quizás el resultado más deslumbrante de todos: los tres divisores de haz adicionales y los cuatro detectores de fotones ociosos pueden estar al otro lado del laboratorio o incluso al otro lado del universo, ya que nada en nuestra discusión dependía en absoluto de si recibían un determinado fotón ocioso antes o después de que su compañero fotón de señal llegara a la pantalla. Imaginen, entonces, que estos dispositivos están todos lejos, digamos a diez años luz de distancia, para ser exactos, y piensen en lo que esto implica. Usted realiza hoy el experimento de la figura 7.5b, registrando -uno tras otro- las ubicaciones de impacto de un gran número de fotones de señal, y observa que no muestran ningún signo de interferencia. Si alguien te pide que expliques los datos, podrías estar tentado de decir que debido a los fotones ociosos, la información de cuál camino está disponible y por lo tanto cada fotón de señal definitivamente fue por el camino izquierdo o el derecho, eliminando cualquier posibilidad de interferencia. Pero, como en el caso anterior, esta sería una conclusión precipitada sobre lo que ocurrió; sería una descripción completamente prematura del pasado.

Verás, diez años después, los cuatro detectores de fotones recibirán, uno tras otro, los fotones inactivos. Si posteriormente se le informa sobre qué holgazanes terminaron, digamos, en el detector 2 (por ejemplo, los primeros, séptimos, octavos, duodécimos... holgazanes que llegaron), y si luego regresa a los datos que recogió años antes y resalta las correspondientes ubicaciones de los fotones de señal en la pantalla (por ejemplo, los primeros, séptimos, octavos, duodécimos... fotones de señal que llegaron), encontrará que los puntos de datos resaltados llenan un patrón de interferencia, revelando así que esos fotones de señal deben ser descritos como si hubieran viajado por ambos caminos. Alternativamente, si 9 años, 364 días después de haber recogido los datos de los fotones de señal, un bromista práctico debería sabotear el experimento eliminando los divisores de haz a y b-asegurando que cuando los fotones ociosos lleguen al día siguiente, todos vayan al detector 1 o al detector 4, preservando así *toda* la información de qué camino-entonces, cuando reciba esta información, concluirá que *cada* fotón de señal fue por el camino izquierdo o por el camino derecho, y no habrá ningún patrón de interferencia que extraer de los datos de los fotones de señal. Por lo tanto, como esta discusión destaca con fuerza, la historia que usted contaría para explicar los datos de los fotones de señal depende significativamente de las mediciones realizadas diez años después de que esos datos fueron recogidos.

Una vez más, permítanme enfatizar que las mediciones futuras no cambian nada de lo que ocurrió en su experimento de hoy; las mediciones futuras no cambian de ninguna manera los datos que usted recogió hoy. Pero las mediciones futuras *sí influyen* en el tipo de detalles que puedes invocar cuando posteriormente describas lo que sucedió hoy. Antes de que tengas los resultados de las mediciones de los fotones en reposo, realmente no puedes decir nada en absoluto sobre la historia de los caminos de cualquier fotón de señal dado. Sin embargo, una vez que tienes los resultados, concluyes que los fotones de señal cuyos compañeros ociosos fueron utilizados con éxito para determinar qué información de camino *puede* ser descrito como haber viajado años antes, ya sea a la izquierda o a la derecha. También concluye que los fotones de señal cuyos compañeros ociosos tuvieron su información de "qué camino" borrada*no pueden describirse* como si hubieran viajado años antes en una dirección u otra (una conclusión que puede confirmar convincentemente utilizando los datos de los fotones ociosos recientemente adquiridos para exponer el patrón de interferencia previamente oculto entre esta última clase de fotones de señal). Así vemos que el futuro ayuda a dar forma a la historia que se cuenta del pasado.

Estos experimentos son una magnífica afrenta a nuestras nociones convencionales de espacio y tiempo. Algo que ocurre mucho después y lejos de algo más, sin embargo, es vital para nuestra descripción de ese algo más. Por cualquier cálculo de sentido común clásico, eso es, bueno, una locura. Por supuesto, ese es el punto: el cálculo clásico es el tipo de cálculo equivocado para usar en un universo cuántico. Hemos aprendido de la discusión de Einstein-

Podolsky-Rosen que la física cuántica no es local en el espacio. Si se ha asimilado completamente esa lección, difícil de aceptar por sí misma, estos experimentos, que implican una especie de enredo a través del espacio y del tiempo, pueden no parecer totalmente extraños. Pero para los estándares de la experiencia diaria, ciertamente lo son.

Mecánica cuántica y experiencia

Durante unos días después de que me enteré de estos experimentos, recuerdo haberme sentido muy feliz. Sentí que me habían dado un vistazo a un lado oculto de la realidad. La experiencia común, las actividades cotidianas, ordinarias, de repente parecía parte de una farsa clásica, ocultando la verdadera naturaleza de nuestro mundo cuántico. El mundo de lo cotidiano de repente no parecía más que un acto de magia invertido, haciendo creer a su audiencia en las concepciones habituales y familiares del espacio y el tiempo, mientras que la asombrosa verdad de la realidad cuántica estaba cuidadosamente custodiada por los juegos de manos de la naturaleza.

En los últimos años, los físicos han dedicado muchos esfuerzos a tratar de explicar la prisa de la naturaleza, para averiguar precisamente cómo las leyes fundamentales de la física cuántica se transforman en las leyes clásicas que tienen tanto éxito en la explicación de la experiencia común, en esencia, para averiguar cómo lo atómico y lo subatómico se desprenden de sus rarezas mágicas cuando se combinan para formar objetos macroscópicos. La investigación continúa, pero ya se ha aprendido mucho. Veamos algunos aspectos de particular relevancia para la cuestión de la flecha del tiempo, pero ahora desde el punto de vista de la mecánica cuántica.

La mecánica clásica se basa en ecuaciones que Newton descubrió a finales de 1600. El electromagnetismo se basa en las ecuaciones que Maxwell descubrió a finales de 1800. La relatividad especial se basa en las ecuaciones que Einstein descubrió en 1905, y la relatividad general se basa en las ecuaciones que él descubrió en 1915. Lo que todas estas ecuaciones tienen en común, y lo que es central en el dilema de la flecha del tiempo (como se explica en el último capítulo), es su tratamiento completamente simétrico del pasado y el futuro. En ninguna de estas ecuaciones hay nada que distinga el tiempo "hacia adelante" del tiempo "hacia atrás". El pasado y el futuro están en igualdad de condiciones.

La mecánica cuántica se basa en una ecuación que Erwin Schrödinger descubrió en 1926. [6] No es necesario saber nada sobre esta ecuación más allá del hecho de que toma como entrada la forma de una onda de probabilidad de la mecánica cuántica en un momento del tiempo, como la de la figura 4.5, y permite determinar el aspecto de la onda de probabilidad en cualquier otro momento, antes o después. Si la onda de probabilidad está asociada a una partícula, como un

electrón, se puede utilizar para predecir la probabilidad de que, en un momento determinado, un experimento encuentre el electrón en un lugar determinado. Al igual que las leyes clásicas de Newton, Maxwell y Einstein, la ley cuántica de Schrödinger abarca un tratamiento igualitario del tiempo-futuro y del tiempo-pasado. Una "película" que mostrara una onda de probabilidad que comenzara *así*y terminara *así*podría ser ejecutada a la inversa - mostrando una onda de probabilidad *que comenzara as*í y terminara así - y no habría forma de decir que una evolución era correcta y la otra incorrecta. Ambas serían soluciones igualmente válidas de la ecuación de Schrödinger. Ambas representarían formas igualmente sensatas en las que las cosas podrían evolucionar. [7]

Por supuesto, la "película" a la que ahora se hace referencia es bastante diferente a las que se usaron para analizar el movimiento de una pelota de tenis o un huevo salpicado en el último capítulo. Las ondas de probabilidad no son cosas que podamos ver directamente; no hay cámaras que puedan capturar las ondas de probabilidad en una película. En cambio, podemos describir las ondas de probabilidad usando ecuaciones matemáticas y, a los ojos de nuestra mente, podemos imaginar que la más simple de ellas tiene formas como las de las figuras 4.5 y 4.6. Pero el único acceso que tenemos a las ondas de probabilidad en sí es indirecto, a través del proceso de medición.

Es decir, como se ha esbozado en el capítulo 4 y se ha visto repetidamente en los experimentos anteriores, la formulación estándar de la mecánica cuántica describe el desarrollo de los fenómenos utilizando *dos* etapas bastante distintas. En la primera etapa, la onda de probabilidad -o, en el lenguaje más preciso del campo, la *función de onda*- de un objeto como un electrón evoluciona de acuerdo con la ecuación descubierta por Schrödinger. Esta ecuación asegura que la forma de la función de onda cambia suave y gradualmente, de manera muy parecida a como una onda de agua cambia de forma al viajar de un lado de un lago hacia el otro. [18] En la descripción estándar de la segunda etapa, entramos en contacto con la realidad observable midiendo la posición del electrón, y cuando lo hacemos, la forma de su función de onda cambia brusca y abruptamente. La función de onda del electrón es distinta de los ejemplos más familiares como las ondas de agua y las ondas de sonido: cuando medimos la posición del electrón, su función de onda se dispara o, como se ilustra en la Figura 4.7, se colapsa, cayendo al valor 0 en todos los lugares en los que no se encuentra la partícula y aumentando al 100% de probabilidad en el único lugar en el que se encuentra la partícula por la medición.

La etapa uno -la evolución de las funciones de onda según la ecuación de Schrödinger- es matemáticamente rigurosa, totalmente inequívoca y totalmente aceptada por la comunidad de la física. La etapa dos -el colapso de una función de onda al medirla- es, por el contrario, algo que durante las últimas ocho décadas ha mantenido a los físicos, en el mejor de los casos, ligeramente desconcertados y, en el peor, ha planteado problemas, enigmas y potenciales paradojas que han

devorado las carreras. La dificultad, como se menciona al final del capítulo 4, es que según la ecuación de Schrödinger, las funciones de onda *no* colapsan. El colapso de la función de onda es un añadido. Se introdujo después de que Schrödinger descubriera su ecuación, en un intento de explicar lo que los experimentadores realmente ven. Mientras que una función de onda sin colapsar encarna la extraña idea de que una partícula está aquí y allá, los experimentadores nunca la ven. Siempre encuentran una partícula definitivamente en un lugar u otro; nunca la ven parcialmente aquí y parcialmente allá; la aguja de sus dispositivos de medición nunca se mueve en una mezcla fantasmal de apuntar a este valor y también a ese valor.

Lo mismo ocurre, por supuesto, con nuestras propias observaciones casuales del mundo que nos rodea. Nunca observamos que una silla esté aquí y allá; nunca observamos que la luna esté en una parte del cielo nocturno y en otra; nunca vemos un gato que esté vivo o muerto. La noción de colapso de la función de onda se alinea con nuestra experiencia postulando que el acto de medición induce a la función de onda a renunciar al limbo cuántico y a llevar una de las muchas potencialidades (partícula aquí, o partícula allá) a la realidad.

El rompecabezas de la medición cuántica

Pero, ¿cómo hace un experimentador para hacer una medición para que una función de onda colapse? De hecho, ¿la función de onda colapsa realmente, y si lo hace, qué sucede realmente a nivel microscópico? ¿Todas y cada una de las mediciones causan el colapso? ¿Cuándo ocurre el colapso y cuánto tiempo tarda? Dado que, según la ecuación de Schrödinger, las funciones de onda no colapsan, ¿qué ecuación toma el control en la segunda etapa de la evolución cuántica, y cómo la nueva ecuación destrona la de Schrödinger, usurpando su habitual poder acorazado sobre los procesos cuánticos? Y, de importancia para nuestra actual preocupación por la flecha del tiempo, mientras que la ecuación de Schrödinger, la ecuación que rige la primera etapa, no hace ninguna distinción entre el avance y el retroceso en el tiempo, ¿introduce la ecuación de la segunda etapa una asimetría fundamental entre el tiempo anterior y el posterior a la realización de una medición? Es decir, ¿introduce la mecánica cuántica, *incluida su interfaz con el mundo de lo cotidiano a través de mediciones y observaciones, una flecha* de tiempo en las leyes básicas de la física? Después de todo, hemos discutido antes cómo el tratamiento cuántico del pasado difiere del de la física clásica, y por *pasado nos referimos a* antes de que una observación o medición particular haya tenido lugar. Así que, ¿las mediciones, tal y como se encarnan en la segunda fase del colapso de la función de onda, establecen una asimetría entre el pasado y el futuro, entre antes y después de que se haga una medición?

Estas cuestiones se han resistido obstinadamente a una solución completa y siguen siendo controvertidas. Sin embargo, a través de las décadas, el poder de predicción de la teoría cuántica apenas se ha visto comprometido. La formulación de la etapa uno/etapa dos de la teoría cuántica, aunque la etapa dos ha permanecido misteriosa, predice las probabilidades de medir un resultado u otro. Y estas predicciones se han confirmado repitiendo un experimento dado una y otra vez y examinando la frecuencia con la que se encuentra uno u otro resultado. El fantástico éxito experimental de este enfoque ha superado con creces la incomodidad de no tener una articulación precisa de lo que realmente ocurre en la etapa dos.

Pero la incomodidad siempre ha estado ahí. Y no es simplemente que algunos detalles del colapso de la función de onda no se hayan resuelto del todo. El *problema de la medición cuántica,* como se llama, es un tema que habla de los límites y la universalidad de la mecánica cuántica. Es simple ver esto. El enfoque de la etapa uno / etapa dos introduce una división entre lo que se está observando (un electrón, o un protón, o un átomo, por ejemplo) y el experimentador que hace la observación. Antes de que el experimentador entre en escena, las funciones de onda evolucionan feliz y suavemente según la ecuación de Schrödinger. Pero entonces, cuando el experimentador se entromete con cosas para realizar una medición, las reglas del juego cambian repentinamente. La ecuación de Schrödinger se deja de lado y el colapso de la etapa dos toma el control. Sin embargo, ya que no hay diferencia entre los átomos, protones y electrones que componen el experimentador y el equipo que utiliza, y los átomos, protones y electrones que estudia, ¿por qué hay una división en la forma en que la mecánica cuántica los trata? Si la mecánica cuántica es una teoría universal que se aplica sin limitaciones a *todo,* el observado y el observador deben ser tratados exactamente de la misma manera.

Niels Bohr no estaba de acuerdo. Afirmó que los experimentadores y sus equipos *son* diferentes de las partículas elementales. Aunque están hechos de las mismas partículas, son "grandes" colecciones de partículas elementales y por lo tanto se rigen por las leyes de la física clásica. En algún lugar entre el diminuto mundo de los átomos individuales y las partículas subatómicas y el mundo familiar de las personas y sus equipos, las reglas cambian porque los tamaños cambian. La motivación para afirmar esta división es clara: una partícula diminuta, según la mecánica cuántica, puede ser localizada en una mezcla difusa de aquí y allá, pero no vemos tal comportamiento en el gran mundo cotidiano. ¿Pero exactamente dónde está la frontera? Y, de vital importancia, ¿cómo se interrelacionan los dos conjuntos de reglas cuando el gran mundo cotidiano se enfrenta al minúsculo mundo atómico, como en el caso de una medición? Bohr declaró enérgicamente que estas preguntas estaban fuera de los límites, con lo que quiso decir, a decir verdad, que estaban más allá de los límites de lo que él o cualquier otra persona podía responder. Y dado que incluso sin abordarlos la teoría hace predicciones sorprendentemente precisas, durante mucho tiempo tales cuestiones estuvieron

muy abajo en la lista de preguntas críticas que los físicos se vieron obligados a resolver.

Pero para entender completamente la mecánica cuántica, para determinar completamente lo que dice sobre la realidad, y para establecer el papel que podría jugar en el establecimiento de la dirección de la flecha del tiempo, debemos abordar el problema de la medición cuántica.

En las próximas dos secciones, describiremos algunos de los más prominentes y prometedores intentos de hacerlo. El resultado, si en algún momento quiere pasar a la última sección centrada en la mecánica cuántica y la flecha del tiempo, es que mucho trabajo ingenioso en el problema de la medición cuántica ha producido un progreso significativo, pero una solución ampliamente aceptada parece todavía un poco fuera de nuestro alcance. Muchos ven esto como la brecha más importante en nuestra formulación de la ley cuántica.

La realidad y el problema de la medición cuántica

A lo largo de los años, ha habido muchas propuestas para resolver el problema de la medición cuántica. Irónicamente, aunque implican diferentes concepciones de la realidad -algunas drásticamente diferentes- cuando se trata de predicciones sobre lo que un investigador medirá en casi todos los experimentos, todos están de acuerdo y cada uno funciona como un encanto. Cada propuesta da el mismo espectáculo, aunque, si se mira entre bastidores, se verá que sus modus operandi difieren sustancialmente.

Cuando se trata de entretenimiento, generalmente no quieres saber lo que está pasando en las alas; estás perfectamente contento de centrarte únicamente en la producción. Pero cuando se trata de entender el universo, hay un impulso insaciable de correr todas las cortinas, abrir todas las puertas, y exponer completamente el profundo funcionamiento interno de la realidad. Bohr consideró este impulso infundado y equivocado. Para él, la realidad *era* la actuación. Como un soliloquio de Spalding Gray, las medidas de los huesos desnudos de un experimentador *son* todo el espectáculo. No hay nada más. De acuerdo con Bohr, no hay tras bastidores. Tratar de analizar cómo, cuándo y por qué una función de onda cuántica renuncia a todas las posibilidades y produce un único número definido en un dispositivo de medición no tiene sentido. El número medido en sí mismo es todo lo que merece atención.

Durante décadas, esta perspectiva ha prevalecido. Sin embargo, a pesar de su efecto calmante en la mente que lucha con la teoría cuántica, uno no puede evitar sentir que el fantástico poder de predicción de la mecánica cuántica significa que se *está* aprovechando una realidad oculta que subyace en el funcionamiento del universo. No se puede evitar querer ir más allá y entender cómo la mecánica

cuántica interactúa con la experiencia común, cómo tiende un puente entre la función de onda y la observación, y qué realidad oculta subyace en las observaciones. A lo largo de los años, varios investigadores han aceptado este desafío; aquí hay algunas propuestas que han desarrollado.

Un enfoque, con raíces históricas que se remontan a Heisenberg, es abandonar la visión de que las funciones de onda son características objetivas de la realidad cuántica y, en su lugar, verlas simplemente como una encarnación de lo que conocemos de la realidad. Antes de realizar una medición, no sabemos dónde está el electrón y, según este punto de vista, nuestra ignorancia de su ubicación se refleja en la función de onda del electrón, que describe que posiblemente se encuentra en una variedad de posiciones diferentes. Sin embargo, en el momento en que medimos su posición, nuestro conocimiento de su paradero cambia repentinamente: ahora conocemos su posición, en principio, con total precisión. (Por el principio de incertidumbre, si conocemos su ubicación necesariamente seremos completamente ignorantes de su velocidad, pero eso no es un tema para la discusión actual). Este cambio repentino en nuestro conocimiento, según esta perspectiva, se refleja en un cambio súbito en la función de onda del electrón: de repente se colapsa y toma la forma puntiaguda de la figura 4.7, indicando nuestro conocimiento definitivo de la posición del electrón. Así pues, en este enfoque, el abrupto colapso de una función de onda no es nada sorprendente: no es más que el abrupto cambio en el conocimiento que todos experimentamos cuando aprendemos algo nuevo.

Un segundo enfoque, iniciado en 1957 por el estudiante de Wheeler Hugh Everett, niega que las funciones de onda se colapsen alguna vez. En su lugar, todos y cada uno de los resultados potenciales encarnados en una función de onda ven la luz del día; la luz del día que cada uno ve, sin embargo, fluye a través de su propio universo separado. En este enfoque, la *interpretación de Muchos M*undos, el concepto de "el universo" se amplía para incluir innumerables "universos paralelos", es decir, innumerables versiones de nuestro universo, de modo que cualquier cosa que la mecánica cuántica prediga *podría suceder*, aunque sólo sea con una probabilidad minúscula*sucede* en al menos una de las copias. Si una función de onda dice que un electrón puede estar aquí, allá y muy lejos, entonces en un universo una versión de usted lo encontrará aquí; en otro universo, otra copia de usted lo encontrará allá; y en un tercer universo, otro encontrará el electrón muy lejos. La secuencia de observaciones que cada uno de nosotros hace de un segundo a otro refleja así la realidad que tiene lugar en una sola parte de esta gigantesca e infinita red de universos, cada uno de ellos poblado por copias de ti y de mí y de todos los demás que todavía están vivos en un universo en el que ciertas observaciones han dado ciertos resultados. En uno de esos universos estás leyendo estas palabras, en otro te has tomado un descanso para navegar por la web, en otro estás esperando ansiosamente que se levante el telón para tu debut en Broadway. Es como si no hubiera un solo bloque espacio-tiempo como se muestra en la figura 5.1, sino un número infinito, en el que cada uno se

da cuenta de un posible curso de acontecimientos. En el enfoque de Muchos Mundos, entonces, ningún resultado potencial permanece simplemente como un potencial. Las funciones de onda no colapsan. Cada resultado potencial sale en uno de los universos paralelos.

Una tercera propuesta, desarrollada en la década de 1950 por David Bohm -el mismo físico que encontramos en el capítulo 4 al discutir la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen- adopta un enfoque completamente diferente. [8] Bohm argumentó que las partículas como los electrones poseen posiciones y velocidades definidas, como en la física clásica, y como Einstein esperaba. Pero, de acuerdo con el principio de incertidumbre, estas características están ocultas a la vista; son ejemplos de las *variables ocultas* mencionadas en el capítulo 4. No se pueden determinar ambas simultáneamente. Para Bohm, tal incertidumbre representaba un límite de lo que podemos conocer, pero no implicaba nada acerca de los atributos reales de las propias partículas. Su enfoque no entra en conflicto con los resultados de Bell porque, como discutimos al final del Capítulo 4, *no* se descarta la posesión de propiedades definidas prohibidas por la incertidumbre cuántica; sólo se descarta la localidad, y el enfoque de Bohm no es local. [9] En su lugar, Bohm imaginó que la función de onda de una partícula es otro *elemento separado de la realidad,* uno que existe *además de la propia partícula.* No son partículas *u ondas*, como en la filosofía de la complementariedad de Bohr; según Bohm, son partículas *y ondas*. Además, Bohm postuló que la función de onda de una partícula interactúa con la partícula misma - "guía" o "empuja" la partícula alrededor - de una manera que determina su movimiento posterior. Si bien este enfoque concuerda plenamente con las predicciones exitosas de la mecánica cuántica estándar, Bohm descubrió que los cambios en la función de onda en un lugar son capaces de empujar inmediatamente una partícula a un lugar distante, un hallazgo que revela explícitamente la no localidad de su enfoque. En el experimento de la doble rendija, por ejemplo, cada partícula pasa por una rendija o por la otra, mientras que su función de onda pasa por ambas y sufre interferencias. Dado que la función de onda guía el movimiento de la partícula, no debería ser terriblemente sorprendente que las ecuaciones muestren que es probable que la partícula aterrice donde el valor de la función de onda es grande y que es improbable que aterrice donde es pequeña, lo que explica los datos de la figura 4.4. En el enfoque de Bohm, no hay una etapa separada de colapso de la función de onda ya que, si se mide la posición de una partícula y se encuentra *aquí,* es realmente donde estaba un momento antes de que la medición tuviera lugar.

Un cuarto enfoque, desarrollado por los físicos italianos Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini y Tullio Weber, hace el atrevido movimiento de modificar la ecuación de Schrödinger de una forma inteligente que apenas tiene efecto en la evolución de las funciones de onda de las partículas individuales, pero que tiene un impacto dramático en la evolución cuántica cuando se aplica a los "grandes" objetos cotidianos. La modificación propuesta prevé que las funciones de onda son

inherentemente inestables; incluso sin ninguna intromisión, estos investigadores sugieren que, tarde o temprano, cada función de onda colapsa, por sí misma, hasta alcanzar una forma puntiaguda. Para una partícula individual, Ghirardi, Rimini y Weber postulan que el colapso de la función de onda ocurre espontánea y aleatoriamente, produciéndose, en promedio, sólo una vez cada mil millones de años más o menos. [10] Esto es tan poco frecuente que implica sólo el más mínimo cambio en la descripción habitual de la mecánica cuántica de las partículas individuales, y eso es bueno, ya que la mecánica cuántica describe el micromundo con una precisión sin precedentes. Pero para los objetos grandes como los experimentadores y sus equipos, que tienen miles de millones y miles de millones de partículas, las probabilidades son altas de que en una diminuta fracción de segundo el supuesto colapso espontáneo se produzca para al menos una partícula constituyente, provocando el colapso de su función de onda. Y, como sostienen Ghirardi, Rimini, Weber y otros, la naturaleza enmarañada de todas las funciones de onda individuales en un objeto grande asegura que este colapso inicie una especie de efecto dominó cuántico en el que las funciones de onda de todas las partículas constituyentes colapsen también. Como esto ocurre en una breve fracción de segundo, la modificación propuesta asegura que los grandes objetos están esencialmente siempre en una configuración definida: los punteros de los equipos de medición siempre apuntan a un valor definido; la luna está siempre en un lugar definido del cielo; los cerebros de los experimentadores siempre tienen una experiencia definida; los gatos siempre están vivos o muertos.

Cada uno de estos enfoques, así como otros que no voy a discutir, tiene sus partidarios y detractores. El enfoque de "la función de onda como conocimiento" refina el tema del colapso de la función de onda negando cualquier realidad para las funciones de onda, convirtiéndolas en cambio en meros descriptores de lo que conocemos. Pero ¿por qué, se pregunta un detractor, la física fundamental debería estar tan estrechamente ligada a la conciencia humana? Si no estuviéramos aquí para observar el mundo, ¿las funciones de onda nunca colapsarían o, quizás, no existiría el concepto mismo de una función de onda? ¿Era el universo un lugar muy diferente antes de que la conciencia humana evolucionara en el planeta Tierra? ¿Y si, en lugar de los experimentadores humanos, los ratones u hormigas o las amebas o las computadoras son los únicos observadores? ¿Es el cambio en su "conocimiento" adecuado para ser asociado con el colapso de una función de onda? [11]

Por el contrario, la interpretación de Muchos Mundos evita todo el asunto del colapso de la función de onda, ya que en este enfoque las funciones de onda no colapsan. Pero el precio a pagar es una enorme proliferación de universos, algo que muchos detractores han encontrado intolerablemente exorbitante. [12] El enfoque de Bohm también evita el colapso de la función de onda; pero, sus detractores afirman que, al conceder una realidad independiente tanto a las partículas como a las ondas, la teoría carece de economía. Además, los detractores argumentan correctamente que, en la formulación de Bohm, la función

de onda puede ejercer influencias más rápidas que la luz en las partículas que empuja. Los partidarios señalan que la primera queja es subjetiva en el mejor de los casos, y la segunda se ajusta a la no localidad que Bell demostró ser inevitable, por lo que ninguna de las dos críticas es convincente. Sin embargo, quizás injustificadamente, el enfoque de Bohm nunca se ha puesto de moda. [13] El enfoque de Ghirardi-Rimini-Weber trata directamente el colapso de la función de onda, cambiando las ecuaciones para incorporar un nuevo mecanismo de colapso espontáneo. Pero, los detractores señalan que todavía no hay ni una pizca de evidencia experimental que apoye la propuesta de modificación de la ecuación de Schrödinger.

Las investigaciones que buscan una conexión sólida y totalmente transparente entre el formalismo de la mecánica cuántica y la experiencia de la vida cotidiana sin duda seguirán durante algún tiempo, y es difícil decir cuál de los enfoques conocidos, si es que hay alguno, logrará finalmente un consenso mayoritario. Si los físicos fueran encuestados hoy, no creo que hubiera un favorito abrumador. Desafortunadamente, la aportación experimental es de ayuda limitada. Mientras que la propuesta de Ghirardi-Rimini-Weber hace predicciones que pueden, en ciertas situaciones, diferir de la mecánica cuántica estándar de etapa uno / etapa dos, las desviaciones son demasiado pequeñas para ser probadas con la tecnología actual. La situación con las otras tres propuestas es peor porque obstaculizan la adjudicación experimental de manera aún más definitiva. Están totalmente de acuerdo con el enfoque estándar, y por lo tanto cada una da las mismas predicciones para las cosas que pueden ser observadas y medidas. Sólo difieren en cuanto a lo que ocurre entre bastidores, por así decirlo. Sólo difieren, es decir, con respecto a lo que la mecánica cuántica implica para la naturaleza subyacente de la realidad.

Aunque el problema de la medición cuántica sigue sin resolverse, en los últimos decenios se ha venido elaborando un marco que, aunque todavía incompleto, cuenta con un amplio apoyo como probable ingrediente de cualquier solución viable. Se llama *decoherencia.*

Decoherencia y realidad cuántica

Cuando se encuentra por primera vez el aspecto probabilístico de la mecánica cuántica, una reacción natural es pensar que no es más exótico que las probabilidades que surgen en los lanzamientos de monedas o en las ruedas de la ruleta. Pero cuando aprendes sobre la interferencia cuántica, te das cuenta de que la probabilidad entra en la mecánica cuántica de una forma mucho más fundamental. En ejemplos cotidianos, se asignan probabilidades a varios resultados -cabeza contra cruz, rojo contra negro, un número de lotería contra otro- entendiendo que uno u otro resultado ocurrirá definitivamente y que cada

resultado es el producto final de una historia independiente y definida. Cuando se tira una moneda, a veces el movimiento de giro es justo para que el lanzamiento salga cara y a veces es justo para que el lanzamiento salga cruz. La probabilidad 50-50 que asignamos a cada resultado se refiere no sólo al resultado final -cabeza o cruz- sino también a las historias que conducen a cada resultado. La mitad de las posibles formas de lanzar una moneda resultan en cara y la otra mitad en cruz. Las historias en sí mismas, sin embargo, son alternativas totalmente separadas y aisladas. No tiene sentido que los diferentes movimientos de la moneda se refuercen o se anulen entre sí. Todas son independientes.

Pero en la mecánica cuántica, las cosas son diferentes. Los caminos alternativos que un electrón puede seguir desde las dos rendijas hasta el detector no son historias separadas y aisladas. Las posibles historias se mezclan para producir el resultado observado. Algunos caminos se refuerzan entre sí, mientras que otros se anulan entre sí. Esta interferencia cuántica entre las diversas historias posibles es responsable del patrón de bandas claras y oscuras en la pantalla del detector. Así pues, *la diferencia reveladora entre las nociones cuánticas y* clásicas *de probabilidad es que la primera está sujeta a interferencia y la segunda no.*

La decoherencia es un fenómeno muy extendido que forma un puente entre la física cuántica de los pequeños y la física clásica de los no tan pequeños al suprimir la interferencia cuántica, es decir, al disminuir bruscamente la diferencia esencial entre las probabilidades cuánticas y las clásicas. La importancia de la decoherencia se comprendió desde los primeros días de la teoría cuántica, pero su encarnación moderna se remonta a un documento fundamental del físico alemán Dieter Zeh en 1970, [14] y desde entonces ha sido desarrollado por muchos investigadores, incluidos Erich Joos, también de Alemania, y Wojciech Zurek, del Laboratorio Nacional de Los Álamos en Nuevo México.

Esta es la idea. Cuando la ecuación de Schrödinger se aplica en una situación simple como el paso de fotones individuales y aislados a través de una pantalla con dos rendijas, da lugar al famoso patrón de interferencia. Pero hay dos características muy especiales de este ejemplo de laboratorio que no son característicos de los acontecimientos del mundo real. Primero, las cosas que encontramos en la vida diaria son más grandes y más complicadas que un solo fotón. Segundo, las cosas que encontramos en la vida diaria no están aisladas: interactúan con nosotros y con el entorno. El libro que ahora está en sus manos está sujeto al contacto humano y, más generalmente, es continuamente golpeado por fotones y moléculas de aire. Además, como el libro mismo está hecho de muchas moléculas y átomos, estos componentes que se sacuden constantemente también rebotan continuamente unos con otros. Lo mismo es cierto para los indicadores de los dispositivos de medición, para los gatos, para los cerebros humanos, y para casi todo lo que se encuentra en la vida cotidiana. En las escalas astrofísicas, la tierra, la luna, los asteroides y los otros planetas son continuamente bombardeados por los fotones del sol. Incluso un grano de polvo que flota en la

oscuridad del espacio exterior está sujeto a los continuos golpes de los fotones de microondas de baja energía que han estado fluyendo por el espacio desde poco tiempo después del big bang. Y así, para entender lo que la mecánica cuántica dice sobre los sucesos del mundo real, en oposición a los prístinos experimentos de laboratorio, deberíamos aplicar la ecuación de Schrödinger a estas situaciones más complejas y desordenadas.

En esencia, esto es lo que Zeh enfatizó, y su trabajo, junto con el de muchos otros que lo han seguido, ha revelado algo bastante maravilloso. Aunque los fotones y las moléculas de aire son demasiado pequeños para tener un efecto significativo en el movimiento de un objeto grande como este libro o un gato, son capaces de hacer algo más. Continuamente "empujan" la función de onda del gran objeto, o, en términos de física, perturban su coherencia*: desdibujan* su secuencia ordenada de cresta seguida de depresión seguida de cresta. Esto es fundamental, porque el orden de una función de onda es fundamental para generar efectos de interferencia (véase la figura 4.2). Así pues, de la misma manera que la adición de dispositivos de marcado al experimento de la doble rendija difumina la función de onda resultante y, por lo tanto, elimina los efectos de interferencia, el constante bombardeo de los objetos por los componentes de su entorno también elimina la posibilidad de que se produzcan fenómenos de interferencia. A su vez, una vez que la interferencia cuántica ya no es posible, las probabilidades inherentes a la mecánica cuántica son, a todos los efectos prácticos, iguales a las probabilidades inherentes al lanzamiento de monedas y a las ruedas de la ruleta. Una vez que la decoherencia ambiental desdibuja una función de onda, la naturaleza exótica de las probabilidades cuánticas se funde con las probabilidades más familiares de la vida cotidiana. [15] Esto sugiere una resolución del rompecabezas de las mediciones cuánticas, una que, si se realizara, sería casi lo mejor que podríamos esperar. Lo describiré primero bajo la luz más optimista, y luego destacaré lo que aún queda por hacer.

Si una función de onda para un electrón aislado muestra que tiene, digamos, un 50 por ciento de probabilidades de estar aquí y un 50 por ciento de probabilidades de estar allí, debemos interpretar estas probabilidades usando la completa rareza de la mecánica cuántica. Dado que ambas alternativas pueden revelarse mezclándose y generando un patrón de interferencia, debemos pensar en ellas como igualmente reales. En un lenguaje poco preciso, hay un sentido en el que el electrón *está* en ambos lugares. ¿Qué pasa ahora si medimos la posición del electrón con un instrumento de laboratorio no aislado y de tamaño normal? Bueno, correspondiendo al ambiguo paradero del electrón, el puntero del instrumento tiene un 50 por ciento de posibilidades de apuntar a este valor y un 50 por ciento de posibilidades de apuntar a ese valor. Pero debido a la decoherencia, el puntero *no* estará en una mezcla fantasmagórica de apuntar a ambos valores; debido a la decoherencia, podemos interpretar *estas* probabilidades en el sentido usual, clásico y cotidiano. Al igual que una moneda tiene un 50 por ciento de probabilidades de que caiga cara y un 50 por ciento de probabilidades de que

caiga cruz, pero que caiga cara *cruz*, el puntero tiene un 50 por ciento de probabilidades de apuntar a este valor y un 50 por ciento de probabilidades de apuntar a ese valor, pero definitivamente apuntará a uno *u* otro.

Un razonamiento similar se aplica a todos los demás objetos complejos no aislados. Si un cálculo cuántico revela que un gato, sentado en una caja cerrada, tiene un 50 por ciento de probabilidades de estar muerto y un 50 por ciento de probabilidades de estar vivo, porque hay un 50 por ciento de probabilidades de que un electrón golpee un mecanismo trampa que somete al gato a un gas venenoso y un 50 por ciento de probabilidades de que el electrón falle a la trampa, la decoherencia sugiere que el gato *no* estará en un absurdo estado mixto de estar vivo y muerto. Aunque se han dedicado décadas de acalorados debates a temas como ¿Qué significa para un gato estar vivo y muerto? ¿Cómo el acto de abrir la caja y observar al gato lo obliga a elegir un estado definido, muerto o vivo?, la decoherencia sugiere que mucho antes de abrir la caja, el entorno ya ha completado miles de millones de observaciones que, en poco tiempo, convirtieron todas las misteriosas probabilidades cuánticas en sus menos misteriosas contrapartes clásicas. Mucho antes de que lo mires, el medio ambiente ha obligado al gato a asumir una condición única y definitiva. La decoherencia obliga a gran parte de la rareza de la física cuántica a "filtrarse" de los grandes objetos ya que, poco a poco, la rareza cuántica es arrastrada por las innumerables partículas impactantes del entorno.

Es difícil imaginar una solución más satisfactoria para el problema de la medición cuántica. Siendo más realistas y abandonando la suposición simplificadora que ignora el medio ambiente -simplificación que fue crucial para avanzar durante el desarrollo temprano del campo- encontraríamos que la mecánica cuántica tiene una solución incorporada. La conciencia humana, los experimentadores humanos y las observaciones humanas ya no jugarían un papel especial ya que ellos (¡nosotros!) serían simplemente elementos del medio ambiente, como las moléculas de aire y los fotones, que pueden interactuar con un sistema físico dado. Tampoco habría ya una división de etapa uno / etapa dos entre la evolución de los objetos y el experimentador que los mide. Todo -observado y observador- estaría en igualdad de condiciones. Todo -observado y observador- estaría sujeto precisamente a la misma ley de la mecánica cuántica que se establece en la ecuación de Schrödinger. El acto de medición ya no sería especial; sería simplemente un ejemplo específico de contacto con el medio ambiente.

¿Es eso? ¿La decoherencia resuelve el problema de la medición cuántica? ¿Es la decoherencia responsable de las funciones de onda que cierran la puerta a todos los resultados potenciales a los que pueden conducir, excepto a uno? Algunos piensan que sí. Investigadores como Robert Griffiths, de Carnegie Mellon; Roland Omnès, de Orsay; el premio Nobel Murray Gell-Mann, del Instituto de Santa Fe; y Jim Hartle, de la Universidad de California en Santa Bárbara, han hecho grandes progresos y afirman que han desarrollado la decoherencia en un marco completo

(llamado *historias decoherentes*) que resuelve el problema de la medición. Otros, como yo, están intrigados pero aún no están totalmente convencidos. Verán, el poder de la decoherencia es que elimina con éxito la barrera artificial que Bohr erigió entre los sistemas físicos grandes y pequeños, haciendo que todo esté sujeto a las mismas fórmulas de mecánica cuántica. Este es un progreso importante y creo que Bohr lo habría encontrado gratificante. Aunque el problema no resuelto de las mediciones cuánticas nunca disminuyó la capacidad de los físicos para conciliar los cálculos teóricos con los datos experimentales, sí llevó a Bohr y a sus colegas a articular un marco de mecánica cuántica con algunas características claramente incómodas. Muchos encontraron desconcertante la necesidad del marco de trabajo de palabras confusas sobre el colapso de la función de onda o la noción imprecisa de "grandes" sistemas pertenecientes al dominio de la física clásica. En gran medida, al tener en cuenta la decoherencia, los investigadores han hecho innecesarias estas ideas vagas.

Sin embargo, una cuestión clave que eludí en la descripción anterior es que, aunque la decoherencia suprime la interferencia cuántica y, por lo tanto, induce a que las extrañas probabilidades cuánticas sean como sus homólogas clásicas conocidas, *cada uno de los resultados potenciales encarnados en una función de onda sigue compitiendo por la realización.* Así que todavía nos preguntamos cómo "gana" un resultado y a dónde "van" las otras muchas posibilidades cuando eso ocurre realmente. Cuando se lanza una moneda, la física clásica da una respuesta a la pregunta análoga. Dice que si se examina la forma en que la moneda se pone a girar con la precisión adecuada, se puede, en principio, *predecir* si caerá cara o cruz. En una inspección más cercana, entonces, precisamente un resultado es determinado por detalles que inicialmente se pasaron por alto. No se puede decir lo mismo en la física cuántica. La decoherencia permite que las probabilidades cuánticas se interpreten de forma muy parecida a las clásicas, pero no proporciona detalles más finos que seleccionen uno de los muchos resultados posibles para que ocurra realmente.

Muy en el espíritu de Bohr, algunos físicos creen que la búsqueda de tal explicación de cómo surge un resultado único y definitivo es errónea. Estos físicos argumentan que la mecánica cuántica, con su actualización para incluir la decoherencia, es una teoría muy bien formulada cuyas predicciones dan cuenta del comportamiento de los aparatos de medición de laboratorio. Y según este punto de vista, *ese* es el objetivo de la ciencia. Buscar una explicación de *lo que realmente está pasando, esforzarse* por comprender *cómo se llegó a un resultado particular,* buscar un nivel de *realidad más allá de las lecturas de los detectores y las impresiones de las computadoras traiciona* una codicia intelectual irracional.

Muchos otros, incluido yo, tienen una perspectiva diferente. Explicar los datos *es* de lo que trata la ciencia. Pero muchos físicos creen que la ciencia también se trata de adoptar las teorías que los datos confirman e ir más allá usándolas para obtener la máxima comprensión de la naturaleza de la realidad. Sospecho

firmemente que se puede ganar mucho conocimiento empujando hacia una solución completa del problema de la medición.

Por lo tanto, aunque hay un amplio acuerdo en que la decoherencia inducida por el medio ambiente es una parte crucial de la estructura que abarca desde la división cuántica hasta la clásica, y aunque muchos tienen la esperanza de que estas consideraciones se unan algún día en una conexión completa y convincente entre ambas, no todo el mundo está convencido de que el puente se haya construido todavía por completo.

La Mecánica Cuántica y la Flecha del Tiempo

Entonces, ¿dónde estamos en el problema de la medición, y qué significa para la flecha del tiempo? A grandes rasgos, hay dos clases de propuestas para vincular la experiencia común con la realidad cuántica. En la primera clase (por ejemplo, la función de onda como conocimiento; Muchos mundos; decoherencia), la ecuación de Schrödinger es el punto de partida y el punto final de la historia; las propuestas simplemente proporcionan diferentes maneras de interpretar lo que la ecuación significa para la realidad física. En la segunda clase (por ejemplo, Bohm; Ghirardi-Rimini-Weber), la ecuación de Schrödinger debe complementarse con otras ecuaciones (en el caso de Bohm, una ecuación que muestra cómo una función de onda empuja una partícula) o debe modificarse (en el caso de Ghirardi-Rimini-Weber, para incorporar un nuevo y explícito mecanismo de colapso). Una cuestión clave para determinar el impacto en la flecha del tiempo es si estas propuestas introducen una asimetría fundamental entre una dirección en el tiempo y la otra. Recuerde, la ecuación de Schrödinger, al igual que las de Newton, Maxwell y Einstein, trata hacia adelante y hacia atrás en el tiempo en un plano completamente igual. No proporciona ninguna flecha a la evolución temporal. ¿Alguna de las propuestas cambia esto?

En la primera clase de propuestas, el marco de Schrödinger no se modifica en absoluto, por lo que se mantiene la simetría temporal. En la segunda clase, la simetría temporal puede o no sobrevivir, dependiendo de los detalles. Por ejemplo, en el enfoque de Bohm, la nueva ecuación propuesta trata el tiempo futuro y el tiempo pasado en pie de igualdad, por lo que no se introduce ninguna asimetría. Sin embargo, la propuesta de Ghirardi, Rimini y Weber introduce un mecanismo de colapso que *sí* tiene una flecha temporal: una función de onda "descolapsante", que va de una forma de pico a una forma de dispersión, no se ajustaría a las ecuaciones modificadas. Así pues, según la propuesta, la mecánica cuántica, junto con una resolución del rompecabezas de la medición cuántica, puede o no continuar tratando cada dirección en el tiempo de manera igualitaria. Consideremos las implicaciones de cada posibilidad.

Si la simetría temporal persiste (como sospecho que lo hará), todo el razonamiento y todas las conclusiones del último capítulo se pueden llevar a cabo con pocos cambios en el ámbito cuántico. El núcleo de la física que entró en nuestra discusión sobre la flecha del tiempo fue la simetría de tiempo inverso de la física clásica. Mientras que el lenguaje básico y el marco de la física cuántica difieren de los de la física clásica -funciones de onda en lugar de posiciones y velocidades-, la ecuación de Schrödinger en lugar de las leyes de Newton -simetría de tiempo invertido de todas las ecuaciones cuánticas- aseguraría que el tratamiento de la flecha del tiempo no cambiaría. La entropía en el mundo cuántico puede definirse como en la física clásica siempre que describamos las partículas en términos de sus funciones de onda. Y la conclusión de que la entropía debería estar siempre en ascenso, aumentando tanto hacia lo que llamamos el futuro como hacia lo que llamamos el pasado, seguiría vigente.

Así llegamos al mismo rompecabezas que encontramos en el capítulo 6. Si tomamos nuestras observaciones del mundo ahora mismo como dadas, como innegablemente reales, y si la entropía debe aumentar tanto hacia el futuro como hacia el pasado, ¿cómo explicamos cómo el mundo llegó a ser como es y cómo se desarrollará posteriormente? Y se presentarían las mismas dos posibilidades: o bien todo lo que vemos aparece en la existencia por una casualidad estadística que se esperaría que ocurriera de vez en cuando en un universo eterno que pasa la gran mayoría de su tiempo totalmente desordenado, o bien, por alguna razón, la entropía fue asombrosamente baja justo después del big bang y durante los últimos 14.000 millones de años las cosas se han ido desenvolviendo lentamente y seguirán haciéndolo hacia el futuro. Como en el capítulo 6, para evitar el atolladero de no confiar en los recuerdos, los registros y las leyes de la física, nos centramos en la segunda opción -un estallido de baja entropía- y buscamos una explicación de cómo y por qué las cosas comenzaron en un estado tan especial.

Si, por otra parte, se pierde la simetría del tiempo -si la resolución del problema de medición que se acepta algún día revela un tratamiento asimétrico fundamental del futuro frente al pasado dentro de la mecánica cuántica- podría muy bien proporcionar la explicación más directa de la flecha del tiempo. Podría mostrar, por ejemplo, que los huevos se salpican pero no se desparraman porque, a diferencia de lo que encontramos usando las leyes de la física clásica, la salpicadura resuelve todas las ecuaciones cuánticas pero la desparramar no. Una película al revés de un huevo salpicado representaría un movimiento que no podría ocurrir en el mundo real, lo que explicaría por qué nunca lo hemos visto. Y eso sería todo.

Posiblemente. Pero aunque esto parecería proporcionar una explicación muy diferente de la flecha del tiempo, en realidad puede no ser tan diferente como parece. Como enfatizamos en el capítulo 6, para que las páginas de *Guerra y Paz* se vuelvan cada vez más desordenadas deben comenzar ordenadas; para que un huevo se desordene por salpicadura, debe comenzar como un huevo ordenado y prístino; para que la entropía aumente hacia el futuro, la entropía debe ser baja en

el pasado para que las cosas tengan el potencial de desordenarse. Sin embargo, el hecho de que una ley trate el pasado y el futuro de manera diferente no garantiza que la ley dicte un pasado con menor entropía. La ley podría aún implicar una mayor entropía hacia el pasado (tal vez la entropía aumentaría asimétricamente hacia el pasado y el futuro), e incluso es posible que una ley asimétrica al tiempo sea incapaz de decir nada sobre el pasado en absoluto. Esto último es cierto en el caso de la propuesta Ghirardi-Rimini-Weber, una de las únicas propuestas sustantivas de simetría temporal del mercado. Una vez que su mecanismo de colapso hace su trabajo, no hay manera de deshacerlo, no hay manera de empezar desde la función de onda colapsada y evolucionarla de nuevo a su forma anterior de dispersión. La forma detallada de la función de onda se pierde en el colapso -se convierte en un pico- y por lo tanto es imposible "retroceder" a cómo eran las cosas en cualquier momento antes de que ocurriera el colapso.

Así pues, aunque una ley asimétrica al tiempo proporcionaría una explicación parcial de por qué las cosas se desenvuelven en un orden temporal pero nunca en el orden inverso, podría muy bien exigir el mismo suplemento clave requerido por las leyes simétricas al tiempo: una explicación de por qué la entropía era baja en el pasado lejano. Ciertamente, esto es cierto para las modificaciones asimétricas en el tiempo de la mecánica cuántica que se han propuesto hasta ahora. Y así, a menos que algún futuro descubrimiento revele dos características, ambas consideradas poco probables - una solución asimétrica en el tiempo al problema de la medición cuántica que, además, asegure que la entropía disminuya hacia el pasado - nuestro esfuerzo por explicar la flecha del tiempo nos lleva, una vez más, de vuelta al origen del universo, el tema de la siguiente parte del libro.

Como se verá en estos capítulos, las consideraciones cosmológicas se abren camino a través de muchos misterios en el corazón del espacio, el tiempo y la materia. Así que en el viaje hacia la comprensión de la cosmología moderna de la flecha del tiempo, vale la pena no apresurarse a través del paisaje, sino más bien, tomar un paseo bien considerado a través de la historia cósmica.

III - ESPACIO TIEMPO Y COSMOLOGÍA

8 - De copos de nieve y del espacio tiempo

LA SIMETRÍA Y LA EVOLUCIÓN DEL COSMOS

Richard Feynman dijo una vez que si tuviera que resumir el hallazgo más importante de la ciencia moderna en una frase elegiría "El mundo está hecho de átomos". Cuando reconocemos que gran parte de nuestra comprensión del universo depende de las propiedades e interacciones de los átomos - desde la razón por la que las estrellas brillan y el cielo es azul hasta la explicación de por qué sientes este libro en tu mano y ves estas palabras con tus ojos - podemos apreciar bien la elección de Feynman para encapsular nuestro legado científico. Muchos de los principales científicos de hoy en día están de acuerdo en que si se les ofreciera una segunda frase, elegirían "La simetría subyace a las leyes del universo". Durante los últimos cientos de años ha habido muchos trastornos en la ciencia, pero los descubrimientos más duraderos tienen una característica común: han identificado características del mundo natural que permanecen inalteradas incluso cuando se someten a una amplia gama de manipulaciones. Estos atributos inalterables reflejan lo que los físicos llaman simetrías, y han desempeñado un papel cada vez más vital en muchos avances importantes. Esto ha proporcionado una amplia evidencia de que la simetría, en todas sus misteriosas y sutiles apariencias, brilla como una poderosa luz en la oscuridad donde la verdad espera ser descubierta.

De hecho, veremos que la historia del universo es, en gran medida, la historia de la simetría. Los momentos más importantes de la evolución del universo son aquellos en los que el equilibrio y el orden cambian repentinamente, dando lugar a arenas cósmicas cualitativamente diferentes de las de las eras precedentes. La teoría actual sostiene que el universo pasó por varias de estas transiciones durante sus primeros momentos y que *todo lo que* hemos encontrado es un remanente tangible de una época cósmica anterior más simétrica. Pero hay un sentido aún más grandioso, un metasentido, en el que la simetría se encuentra en el centro de un cosmos en evolución. El tiempo mismo está íntimamente entrelazado con la simetría. Como quedará claro, la connotación práctica del tiempo como medida del cambio, así como la propia existencia de una especie de tiempo cósmico que nos permite hablar con sensatez de cosas como "la edad y la evolución del universo en su conjunto", dependen sensiblemente de los aspectos de la simetría. Y a medida que los científicos han examinado esa evolución, mirando hacia el principio en busca de la verdadera naturaleza del espacio y el tiempo, la simetría se ha establecido como la más segura de las guías, proporcionando ideas y respuestas que de otro modo habrían estado completamente fuera de alcance.

La simetría y las leyes de la física

La simetría abunda. Sostenga una bola blanca en su mano y gírela de esta manera o de aquella, gírela alrededor de cualquier eje y se verá exactamente igual. Ponga un plato redondo y plano en un mantel y gírelo alrededor de su

centro: se ve completamente inalterado. Coge suavemente un copo de nieve recién formado y gíralo de modo que cada punta se mueva a la posición que previamente tenía su vecino, y te será difícil notar que has hecho algo. Tome la letra "A", gírela sobre un eje vertical que pase por su vértice, y le proporcionará una réplica perfecta del original.

Como estos ejemplos ponen de manifiesto, las simetrías de un objeto son las manipulaciones, reales o imaginarias, a las que puede ser sometido sin que su apariencia se vea afectada. Cuantos más tipos de manipulaciones pueda soportar un objeto sin ningún efecto discernible, más simétrico será. Una esfera perfecta es altamente simétrica, ya que cualquier rotación sobre su centro, usando un eje de arriba a abajo, un eje de izquierda a derecha, o cualquier eje de hecho, la deja exactamente igual. Un cubo es menos simétrico, ya que sólo las rotaciones en unidades de 90 grados sobre los ejes que pasan por el centro de sus caras (y sus combinaciones) lo dejan con un aspecto inalterado. Por supuesto, si alguien realiza cualquier otra rotación, como en la figura 8.1c, obviamente todavía puede reconocer el cubo, pero también puede ver claramente que alguien lo ha manipulado. Por el contrario, las simetrías son como la prueba de los merodeadores; son manipulaciones que no dejan ninguna evidencia.

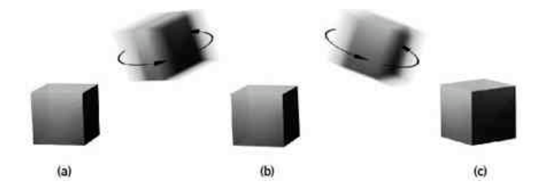


Figura 8.1 Si un cubo, como en el **punto** a**), gira** 90 grados, o sus múltiplos, alrededor de los ejes que pasan por cualquiera de sus caras, se ve sin cambios, como en el **punto** b**).** Pero se puede detectar cualquier otra rotación, como en c).

Todos estos son ejemplos de simetrías de objetos *en* el espacio. Las simetrías que subyacen a las leyes conocidas de la física están estrechamente relacionadas con éstas, pero nos centramos en una cuestión más abstracta: ¿qué manipulaciones -una vez más, reales o imaginarias- pueden realizarse en usted o en el entorno que no tendrán absolutamente ningún efecto en las *leyes* que explican los fenómenos físicos que usted observa? Note que para ser una simetría, las manipulaciones de este tipo no son necesarias para dejar sus observaciones sin cambios. En cambio, nos preocupa si las leyes que rigen esas observaciones - las leyes que explican lo que ves antes, y luego lo que ves después, alguna manipulación - no han cambiado. Como esta es una idea central, veámosla en funcionamiento en algunos ejemplos.

Imagina que eres una gimnasta olímpica y que durante los últimos cuatro años has estado entrenando diligentemente en tu centro de gimnasia de Connecticut. A través de una repetición aparentemente interminable, ha logrado que cada

movimiento de sus diversas rutinas sea perfecto: sabe lo difícil que es empujar la viga de equilibrio para ejecutar una caminata aérea, lo alto que es saltar en el ejercicio de suelo para una disposición de doble giro, lo rápido que es balancearse en las barras paralelas para lanzar su cuerpo en un perfecto desmontaje de doble salto mortal. En efecto, tu cuerpo ha adquirido un sentido innato de las leyes de Newton, ya que son estas mismas leyes las que gobiernan el movimiento de tu cuerpo. Ahora, cuando finalmente haces tus rutinas frente a un público repleto en la ciudad de Nueva York, el lugar de la competición olímpica en sí, estás apostando por las mismas leyes que sostienen, ya que pretendes realizar tus rutinas exactamente como lo has hecho en la práctica. Todo lo que sabemos sobre las leyes de Newton da crédito a su estrategia. Las leyes de Newton no son específicas para un lugar u otro. No funcionan de una manera en Connecticut y de otra en Nueva York. Más bien, creemos que sus leyes funcionan exactamente de la misma manera sin importar dónde se encuentren. Aunque hayas cambiado de lugar, las leyes que gobiernan el movimiento de tu cuerpo no se ven afectadas como la apariencia de una bola blanca que ha sido rotada.

Esta simetría se conoce como *simetría translacional* o invariancia *translacional.* Se aplica no sólo a las leyes de Newton sino también a las leyes de Maxwell del electromagnetismo, a las relatividades especiales y generales de Einstein, a la mecánica cuántica y a casi cualquier propuesta de la física moderna que alguien se haya tomado en serio.

Sin embargo, noten una cosa importante. Los detalles de sus observaciones y experiencias pueden y a veces variarán de un lugar a otro. Si realizara sus rutinas de gimnasia en la luna, encontraría que el camino que su cuerpo tomó en respuesta a la misma fuerza de salto hacia arriba de sus piernas sería muy diferente. Pero entendemos completamente esta diferencia en particular y ya está integrada en las propias leyes. La Luna es menos masiva que la Tierra, por lo que ejerce menos atracción gravitacional; como resultado, tu cuerpo viaja a lo largo de diferentes trayectorias. Y este hecho -que la atracción gravitatoria de un cuerpo depende de su masa- es una parte *integral* de la ley de la gravedad de Newton (así como de la más refinada relatividad general de Einstein). La diferencia entre sus experiencias en la Tierra y la Luna no implica que la ley de la gravedad haya cambiado de un lugar a otro. En su lugar, simplemente refleja una diferencia ambiental que la ley de la gravedad ya acomoda. Así que cuando dijimos que las leyes conocidas de la física se aplican igualmente bien en Connecticut o Nueva York -o, añadamos ahora, en la luna- eso era cierto, pero tened en cuenta que puede que necesitéis especificar las diferencias ambientales de las que dependen las leyes. Sin embargo, y esta es la conclusión clave, el marco explicativo que proporcionan las leyes no se modifica en absoluto por un cambio de ubicación. Un cambio de ubicación no requiere que los físicos vuelvan a la mesa de dibujo y propongan nuevas leyes.

Las leyes de la física no tenían que operar de esta manera. Podemos imaginar un universo en el que las leyes físicas son tan variables como las de los gobiernos locales y nacionales; podemos imaginar un universo en el que las leyes de la física con las que estamos familiarizados no nos dicen nada sobre las leyes de la física en la luna, en la galaxia de Andrómeda, en la nebulosa del Cangrejo, o en el otro lado del universo. De hecho, no sabemos con absoluta certeza que las leyes que funcionan aquí son las mismas que funcionan en los rincones lejanos del cosmos. Pero sí sabemos que si las leyes cambian de alguna manera allá afuera, debe ser *allá* afuera, porque observaciones astronómicas cada vez más precisas han proporcionado evidencia cada vez más convincente de que las leyes son uniformes en todo el espacio, al menos en el espacio que podemos ver. Esto resalta el asombroso poder de la simetría. Estamos ligados al planeta Tierra y sus alrededores.

Y sin embargo, debido a la simetría traslacional, podemos aprender sobre las leyes fundamentales que actúan en todo el universo sin alejarnos de nuestro hogar, ya que las leyes que descubrimos aquí *son* esas leyes.

La simetría rotacional o invariancia *rotacional* es un primo cercano de la invariancia translacional. Se basa en la idea de que cada dirección espacial está en igualdad de condiciones con todas las demás. La vista desde la Tierra ciertamente no te lleva a esta conclusión. Cuando miras hacia arriba, ves cosas muy diferentes a las que ves hacia abajo. Pero, de nuevo, esto refleja detalles del entorno; no es una característica de las leyes subyacentes en sí mismas. Si dejas la Tierra y flotas en el espacio profundo, lejos de cualquier estrella, galaxia u otro cuerpo celeste, la simetría se hace evidente: no hay nada que distinga una dirección particular en el vacío negro de otra. Todos están a la par. No tendrías que pensar ni por un momento si un laboratorio del espacio profundo que estás montando para investigar las propiedades de la materia o las fuerzas debería orientarse de esta manera o de aquella, ya que las leyes subyacentes son insensibles a esta elección. Si una noche un bromista cambiara la configuración giroscópica del laboratorio, causando que rote un cierto número de grados sobre algún eje en particular, esperarías que esto no tenga ninguna consecuencia para las leyes de la física probadas por tus experimentos. Todas las mediciones realizadas confirman plenamente esta expectativa. Por lo tanto, creemos que las leyes que gobiernan los experimentos que usted lleva a cabo y que explican los resultados que usted encuentra son insensibles tanto al lugar donde usted se encuentra - esto es simetría translacional - como a cómo usted se orienta en el espacio - esto es simetría rotacional.[1]

Como discutimos en el capítulo 3, Galileo y otros eran muy conscientes de otra simetría que las leyes de la física deben respetar. Si su laboratorio del espacio profundo se mueve a una velocidad constante -independientemente de si se mueve a 5 millas por hora en esta dirección o a 100.000 millas por hora en esa dirección- el movimiento no debería tener absolutamente ningún efecto sobre las leyes que explican sus observaciones, porque está tan justificado como el siguiente en afirmar que está en reposo y que es todo lo demás lo que se está moviendo. Einstein, como hemos visto, amplió esta simetría de una manera completamente inesperada al incluir la velocidad de la luz entre las observaciones que no se verían afectadas ni por su movimiento ni por el de la fuente de luz. Este fue un movimiento sorprendente porque normalmente arrojamos los detalles de la velocidad de un objeto en el contenedor de detalles ambientales, reconociendo que la velocidad observada generalmente depende del movimiento del observador. Pero Einstein, al ver el flujo de simetría de la luz a través de las grietas de la fachada newtoniana de la naturaleza, elevó la velocidad de la luz a una ley inviolable de la naturaleza, declarándola tan poco afectada por el movimiento como la bola blanca no se ve afectada por las rotaciones.

La relatividad general, el siguiente gran descubrimiento de Einstein, encaja perfectamente en esta marcha hacia teorías con una simetría cada vez mayor. Así como se puede pensar en la relatividad especial como el establecimiento de la simetría entre todos los observadores que se mueven en relación con los demás con una velocidad constante, se puede pensar en la relatividad general como ir un paso más allá y establecer la simetría entre todos los puntos de vista acelerados también. Esto es extraordinario porque, como hemos enfatizado, aunque no se puede sentir un movimiento de velocidad constante, se *puede* sentir un movimiento acelerado. Así que parece que las leyes de la física que describen sus observaciones deben ser seguramente diferentes cuando se está acelerando, para tener en cuenta la fuerza adicional que se siente. Tal *es* el caso del enfoque de Newton; sus leyes, las que aparecen en todos los libros de texto de física de primer año, deben ser modificadas si son utilizadas por un observador acelerador. Pero a través del principio de equivalencia, discutido en el capítulo 3, Einstein se dio cuenta de que la fuerza que se siente al acelerar es indistinguible de la fuerza que se siente en un campo gravitatorio de fuerza adecuada (cuanto mayor es la aceleración, mayor es el campo gravitatorio). Por lo tanto, según la perspectiva más refinada de Einstein, las leyes de la física *no* cambian cuando se acelera, siempre y cuando se incluya un campo gravitatorio adecuado en su descripción del entorno. La relatividad general trata a todos los observadores, incluso a aquellos que se mueven a velocidades arbitrarias no constantes, de igual manera - son completamente simétricos- ya que cada uno puede afirmar que está en reposo atribuyendo las diferentes fuerzas que se sienten al efecto de los diferentes campos gravitatorios. Por lo tanto, las diferencias en las observaciones entre un observador de la aceleración y otro no son más sorprendentes y no proporcionan mayores pruebas de un cambio en las leyes de la naturaleza que las diferencias que se encuentran al realizar su rutina de gimnasia en la Tierra o la Luna.[2]

Estos ejemplos dan una idea de por qué muchos consideran, y sospecho que Feynman habría estado de acuerdo, que las copiosas simetrías que subyacen a la ley natural presentan un estrecho corredor a la hipótesis atómica como un resumen de nuestros más profundos conocimientos científicos. Pero hay más en la historia. En las últimas décadas, los físicos han elevado los principios de simetría al peldaño más alto de la escala explicativa. Cuando te encuentras con una propuesta de ley de la naturaleza, una pregunta natural es: ¿Por qué esta ley? ¿Por qué la relatividad especial? ¿Por qué la relatividad general? ¿Por qué la teoría de Maxwell del electromagnetismo? ¿Por qué las teorías de Yang-Mills de las fuerzas nucleares fuertes y débiles (que veremos en breve)? Una respuesta importante es que estas teorías hacen predicciones que han sido confirmadas repetidamente por experimentos de precisión. Esto es esencial para la confianza que los físicos tienen en las teorías, ciertamente, pero deja fuera algo importante.

Los físicos también creen que estas teorías van por buen camino porque, de alguna manera difícil de describir, se *sienten* bien, y las ideas de simetría son esenciales para este sentimiento. Se siente bien que ningún lugar en el universo

es de alguna manera especial comparado con cualquier otro, así que los físicos tienen confianza en que la simetría traslacional debería estar entre las simetrías de las leyes de la naturaleza. Se siente bien que ningún movimiento de velocidad constante en particular sea de alguna manera especial comparado con cualquier otro, así que los físicos tienen confianza en que la relatividad especial, al abarcar completamente la simetría entre todos los observadores de velocidad constante, es una parte esencial de las leyes de la naturaleza. Además, parece correcto que *cualquier* punto de vista de observación -independientemente del posible movimiento acelerado involucrado- debería ser tan válido como cualquier otro, y por ello los físicos creen que la relatividad general, la teoría más simple que incorpora esta simetría, está entre las verdades profundas que rigen los fenómenos naturales. Y, como veremos en breve, las teorías de las tres fuerzas distintas de la gravedad -el electromagnetismo y las fuerzas nucleares fuertes y débiles- se basan en otros principios de simetría algo más abstractos pero igualmente convincentes. Así que las simetrías de la naturaleza no son meramente consecuencias de las leyes de la naturaleza. Desde nuestra perspectiva moderna, las simetrías son el fundamento de las leyes.

Simetría y tiempo

Más allá de su papel en la formación de las leyes que rigen las fuerzas de la naturaleza, las ideas de simetría son vitales para el concepto de tiempo en sí mismo. Nadie ha encontrado aún la definición definitiva y fundamental del tiempo, pero, sin duda, parte del papel del tiempo en la composición del cosmos es que es el contable del cambio. Reconocemos que el tiempo ha transcurrido al notar que las cosas ahora son diferentes a como eran entonces. La manecilla de la hora de su reloj apunta a un número diferente, el sol está en una posición diferente en el cielo, las páginas de su copia sin encuadernar de Guerra *y Paz* están más desordenadas, el gas de dióxido de carbono que salió corriendo de su botella de Coca-Cola está más extendido - todo esto deja claro que las cosas han cambiado, y el tiempo es lo que proporciona el potencial para que tal cambio se realice. Parafraseando a John Wheeler, el tiempo es la forma que tiene la naturaleza de evitar que todo -todo cambio, es decir- ocurra de una sola vez.

La existencia del tiempo se basa, por lo tanto, en la *ausencia de* una simetría particular: las cosas en el universo deben *cambiar* de momento en momento para que podamos incluso definir una noción de *momento en momento* que se asemeje a nuestra concepción intuitiva. Si hubiera una simetría perfecta entre cómo son las cosas ahora y cómo eran entonces, si el cambio de un momento a otro no tuviera más consecuencias que el cambio de la rotación de una bola blanca, el tiempo, tal como lo concebimos normalmente, no existiría. [3] Esto no quiere decir que la expansión del espacio tiempo, ilustrada esquemáticamente en la figura 5.1, no existiría; podría. Pero dado que todo sería completamente uniforme a lo largo del

eje temporal, no tendría sentido que el universo evolucionara o cambiara. El tiempo sería un rasgo abstracto de esta realidad -la cuarta dimensión del continuo espacio-tiempo- pero de otro modo, sería irreconocible.

Sin embargo, aunque la existencia del tiempo coincide con la falta de una simetría particular, su aplicación a escala cósmica requiere que el universo sea muy respetuoso de una simetría diferente. La idea es simple y responde a una pregunta que se le pudo haber ocurrido al leer el capítulo 3. Si la relatividad nos enseña que el paso del tiempo depende de la velocidad de nuestro movimiento y del campo gravitatorio en el que estamos inmersos, ¿qué significa que los astrónomos y físicos hablen de que todo el universo tiene una edad definida en particular, una edad que hoy en día se considera que es de unos 14.000 millones de años? ¿Catorce mil millones de años según quién? ¿Catorce mil millones de años según qué reloj? ¿Los seres que viven en la distante galaxia Renacuajo también concluirían que el universo tiene 14.000 millones de años, y si es así, qué habría asegurado que sus relojes estuvieran funcionando en sincronía con los nuestros? La respuesta se basa en la simetría-simetría en el espacio.

Si sus ojos pudieran ver la luz cuya longitud de onda es mucho más larga que la de naranja o roja, no sólo podría ver el interior de su horno de microondas estallar en actividad cuando presione el botón de inicio, sino que también vería un tenue y casi uniforme resplandor extendido a través de lo que el resto de nosotros percibimos como un cielo nocturno oscuro. Hace más de cuatro décadas, los científicos descubrieron que el universo está impregnado de radiación de microondas - luz de larga longitud de onda - que es una fría reliquia de las condiciones sofocantes justo después del big bang.[4] Esta *radiación* cósmica de fondo de microondas es perfectamente inofensiva. Al principio, estaba estupendamente caliente, pero a medida que el universo evolucionó y se expandió, la radiación se diluyó y se enfrió constantemente. Hoy en día está a unos 2,7 grados sobre el cero absoluto, y su mayor reclamo de maldad es su contribución de una pequeña fracción de la nieve que se ve en el televisor cuando se desconecta el cable y se pasa a una estación que no está transmitiendo.

Pero esta débil estática da a los astrónomos lo que los huesos de tiranosaurio dan a los paleontólogos: una ventana a épocas anteriores que es crucial para reconstruir lo que ocurrió en el pasado distante. Una propiedad esencial de la radiación, revelada por las mediciones de precisión de los satélites en la última década, es que es extremadamente uniforme. La temperatura de la radiación en una parte del cielo difiere de la de otra parte en menos de una milésima de grado. En la Tierra, tal simetría haría que el Canal del Tiempo fuera poco interesante. Si fuera de 85 grados en Yakarta, inmediatamente se sabría que está entre 84.999 y 85.001 grados en Adelaida, Shanghai, Cleveland, Anchorage y en cualquier otro lugar. En una escala cósmica, por el contrario, la uniformidad de la temperatura de la radiación es *fantásticamente* interesante, ya que proporciona dos conocimientos críticos.

En primer lugar, proporciona pruebas de observación de que en sus primeras etapas el universo no estaba poblado por grandes aglomeraciones de materia, grumosas y de alta entropía, como los agujeros negros, ya que un entorno tan heterogéneo habría dejado una huella heterogénea en la radiación. En cambio, la uniformidad de la temperatura de la radiación atestigua que el joven universo es homogéneo; y, como vimos en el capítulo 6, cuando la gravedad importa -como lo hizo en el denso universo primitivo- la homogeneidad implica una baja entropía. Eso es algo bueno, porque nuestra discusión sobre la flecha del tiempo se basaba en gran medida en que el universo comenzaba con baja entropía. Uno de nuestros objetivos en esta parte del libro es ir tan lejos como podamos para explicar esta observación: queremos entender cómo llegó a ser el entorno homogéneo, de baja entropía y altamente improbable del universo temprano. Esto nos llevaría un gran paso más cerca de comprender el origen de la flecha del tiempo.

Segundo, aunque el universo ha estado evolucionando desde el Big Bang, en promedio la evolución debe haber sido casi idéntica en todo el cosmos. Para que la temperatura aquí y en la galaxia Remolino, y en el cúmulo Coma, y en cualquier otro lugar coincida con cuatro decimales, las condiciones físicas en cada región del espacio deben haber evolucionado esencialmente de la misma manera desde el big bang. Esta es una deducción importante, pero debes interpretarla correctamente. Una mirada al cielo nocturno ciertamente revela un cosmos variado: planetas y estrellas de varios tipos salpicados aquí y allá a través del espacio. El punto, sin embargo, es que cuando analizamos la evolución del universo entero tomamos una perspectiva macro que promedia sobre estas variaciones de "pequeña" escala, y los promedios *a* gran escala ser casi completamente uniformes. Piensa en un vaso de agua. A escala de moléculas, el agua es extremadamente heterogénea: hay una molécula de H_2O por aquí, una extensión de espacio vacío, otra molécula de H_2O por allá, y así sucesivamente. Pero si promediamos las protuberancias moleculares a pequeña escala y examinamos el agua a las "grandes" escalas diarias que podemos ver a simple vista, el agua en el vaso se ve perfectamente uniforme. La falta de uniformidad que vemos cuando miramos al cielo es como la vista microscópica de una sola molécula de H_2O. Pero al igual que con el vaso de agua, cuando el universo se examina en escalas lo suficientemente grandes, del orden de cientos de millones de años luz, parece extraordinariamente homogéneo. La uniformidad de la radiación es, por lo tanto, un testamento fosilizado de la uniformidad tanto de las leyes de la física como de los detalles del medio ambiente en todo el cosmos.

Esta conclusión es de gran importancia porque la uniformidad del universo es lo que nos permite definir un concepto de tiempo aplicable al universo en su conjunto. Si tomamos la medida del cambio como una definición de trabajo del tiempo transcurrido, la uniformidad de las condiciones en todo el espacio es una prueba de la uniformidad del cambio en todo el cosmos, y por lo tanto implica también la uniformidad del tiempo transcurrido. Así como la uniformidad de la estructura geológica de la Tierra permite que un geólogo en América, y uno en

África, y otro en Asia, se pongan de acuerdo sobre la historia y la edad de la Tierra, la uniformidad de la evolución cósmica en todo el espacio permite que un físico en la galaxia de la Vía Láctea, y uno en la galaxia de Andrómeda, y otro en la galaxia del Renacuajo se pongan de acuerdo sobre la historia y la edad del *universo*. Concretamente, la evolución homogénea del universo significa que un reloj de aquí, un reloj de la galaxia de Andrómeda y un reloj de la galaxia del Renacuajo habrán estado sujetos, en promedio, a condiciones físicas casi idénticas y, por lo tanto, habrán marcado el tiempo casi de la misma manera. La homogeneidad del espacio proporciona así una sincronía universal.

Aunque hasta ahora he dejado de lado detalles importantes (como la expansión del espacio, que se trata en la siguiente sección), el debate pone de relieve el núcleo de la cuestión: el tiempo se encuentra en la encrucijada de la simetría. Si el universo tuviera una simetría temporal perfecta, si no cambiara en absoluto, sería difícil definir lo que significa el tiempo. Por otra parte, si el universo no tuviera simetría en el espacio -si, por ejemplo, la radiación de fondo fuera totalmente aleatoria, con temperaturas muy diferentes en las distintas regiones- el tiempo en un sentido cosmológico tendría poco significado. Los relojes en diferentes lugares marcarían el tiempo a ritmos diferentes, y así, si se pregunta cómo eran las cosas cuando el universo tenía 3.000 millones de años, la respuesta dependería del reloj de quién se estuviera mirando para ver que esos 3.000 millones de años habían transcurrido. *Eso sería complicado*. Afortunadamente, nuestro universo no tiene tanta simetría como para que el tiempo no tenga sentido, pero sí tiene suficiente simetría como para que podamos evitar tales complejidades, permitiéndonos hablar de su edad general y su evolución general a través del tiempo.

Así que, volvamos ahora nuestra atención a esa evolución y consideremos la historia del universo.

Estirando la tela

La historia del universo suena como un gran tema, pero a grandes rasgos es sorprendentemente simple y se basa en gran parte en un hecho esencial: El universo se está expandiendo. Como este es *el* elemento central en el desarrollo de la historia cósmica, y, seguramente, es uno de los descubrimientos más profundos de la humanidad, examinemos brevemente cómo sabemos que es así.

En 1929, Edwin Hubble, usando el telescopio de 100 pulgadas en el observatorio de Mount Wilson en Pasadena, California, encontró que el par de docenas de galaxias que podía detectar se estaban alejando. [5] De hecho, Hubble descubrió que cuanto más distante está una galaxia, más rápido es su recesión. Para dar una sensación de escala, versiones más refinadas de las observaciones originales del Hubble (que han estudiado miles de galaxias utilizando, entre otros equipos, el Telescopio Espacial Hubble) muestran que las galaxias que están a 100 millones

de años-luz de nosotros se alejan a unos 5,5 millones de millas por hora, las que están a 200 millones de años-luz se alejan el doble de rápido, a unos 11 millones de millas por hora, las que están a 300 millones de años-luz se alejan tres veces más rápido, a unos 16,5 millones de millas por hora, y así sucesivamente. El de Hubble fue un descubrimiento impactante porque el prejuicio científico y filosófico prevaleciente sostenía que el universo era, en sus mayores escalas, estático, eterno, fijo e inmutable. Pero de un solo golpe, Hubble rompió esa visión. Y en una maravillosa confluencia de experimentos y teoría, la relatividad general de Einstein fue capaz de proporcionar una hermosa explicación para el descubrimiento de Hubble.

En realidad, no creo que encontrar una explicación sea particularmente difícil. Después de todo, si pasas por una fábrica y ves todo tipo de material volando violentamente hacia afuera en todas las direcciones, es probable que pienses que ha habido una explosión. Y si viajaras hacia atrás por los caminos que toman los restos de metal y los trozos de hormigón, los encontrarías a todos convergiendo en un lugar que sería un probable candidato para el lugar de la explosión. Por el mismo razonamiento, ya que la vista desde la Tierra, como atestiguan las observaciones del Hubble y posteriores, muestra que las galaxias se precipitan hacia el exterior, se podría pensar que nuestra posición en el espacio fue la ubicación de una antigua explosión que arrojó uniformemente la materia prima de las estrellas y galaxias. El problema con esta teoría, sin embargo, es que señala una región del espacio, nuestra región, como única, convirtiéndola en el lugar de nacimiento del universo. Y si ese fuera el caso, implicaría una asimetría profundamente arraigada: las condiciones físicas en las regiones alejadas de la explosión primordial, lejos de nosotros, serían muy diferentes de las de aquí. Como no hay evidencia de tal asimetría en los datos astronómicos, y además, como somos altamente sospechosos de explicaciones antropocéntricas ligadas al pensamiento pre-copernicano, se requiere una interpretación más sofisticada del descubrimiento de Hubble, una en la que nuestra ubicación no ocupe un lugar especial en el orden cósmico.

La relatividad general proporciona tal interpretación. Con la relatividad general, Einstein descubrió que el espacio y el tiempo son flexibles, no fijos, gomosos, no rígidos; y proporcionó ecuaciones que nos dicen precisamente cómo el espacio y el tiempo responden a la presencia de materia y energía. En la década de 1920, el matemático y meteorólogo ruso Alexander Friedmann y el sacerdote y astrónomo belga Georges Lemaître analizaron independientemente las ecuaciones de Einstein tal como se aplican a todo el universo, y ambos encontraron algo sorprendente. Así como la atracción gravitatoria de la Tierra implica que una pelota de béisbol que salta por encima del receptor debe dirigirse más hacia arriba o hacia abajo, pero ciertamente no puede permanecer en su lugar (excepto en el único momento en que alcanza su punto más alto), Friedmann y Lemaître se dieron cuenta de que la atracción gravitatoria de la materia y la radiación extendida por todo el cosmos implica que el tejido del espacio debe estirarse o

contraerse, pero que no puede permanecer fijo en su tamaño. De hecho, éste es uno de los raros ejemplos en los que la metáfora no sólo capta la esencia de la física sino también su contenido matemático ya que, resulta que las ecuaciones que rigen la altura de la pelota de béisbol sobre el suelo son casi idénticas a las ecuaciones de Einstein que rigen el tamaño del universo.[6]

La flexibilidad del espacio en la relatividad general proporciona una manera profunda de interpretar el descubrimiento del Hubble. En lugar de explicar el movimiento hacia afuera de las galaxias por una versión cósmica de la explosión de la fábrica, la relatividad general dice que durante miles de millones de años el espacio se ha estado estirando. Y a medida que se ha ido hinchando, el espacio ha arrastrado a las galaxias unas de otras, de la misma manera que las motas negras en un panecillo de semillas de amapola son arrastradas a medida que la masa se eleva al hornear. Por lo tanto, el origen del movimiento hacia afuera *no* es una explosión que tuvo lugar en el espacio. En su lugar, el movimiento exterior surge de la implacable hinchazón exterior del propio espacio.

Para captar más plenamente esta idea clave, piense también en el modelo de globo del universo en expansión, de gran utilidad, que los físicos invocan a menudo (una analogía que se remonta al menos a una juguetona caricatura, que puede verse en las notas finales, que apareció en un periódico holandés en 1930 tras una entrevista con Willem de Sitter, un científico que hizo importantes contribuciones a la cosmología [7]). Esta analogía compara nuestro espacio tridimensional con la superficie bidimensional más fácil de visualizar de un globo esférico, como en la figura 8.2a, que está siendo inflado a un tamaño cada vez mayor. Las galaxias están representadas por numerosos peniques uniformemente espaciados pegados a la superficie del globo. Obsérvese que a medida que el globo se expande, los peniques se alejan unos de otros, proporcionando una analogía simple de cómo la expansión del espacio impulsa a todas las galaxias a separarse.

Una característica importante de este modelo es que hay una completa simetría entre los centavos, ya que la vista que ve cualquier Lincoln en particular es la misma que la que ve cualquier otro Lincoln. Para imaginárselo, imagínese encogiéndose, recostado sobre un centavo y mirando en todas las direcciones a través de la superficie del globo (recuerde, en esta analogía la superficie del globo representa todo el espacio, por lo que mirar desde la superficie del globo no tiene sentido). ¿Qué observará? Bueno, verás centavos alejándose de ti en todas las direcciones a medida que el globo se expande. Y si te acuestas sobre un centavo diferente, ¿qué observarás? La simetría asegura que verás lo mismo: centavos que se alejan en todas las direcciones. Esta imagen tangible captura bien nuestra creencia, apoyada por estudios astronómicos cada vez más precisos, de que un observador en cualquiera de las más de 100.000 millones de galaxias del universo, mirando a través de su cielo nocturno con un poderoso telescopio, vería,

en promedio, una imagen similar a la que vemos: galaxias circundantes alejándose rápidamente en todas las direcciones.

Y así, a diferencia de la explosión de una fábrica dentro de un espacio fijo preexistente, si el movimiento hacia afuera surge porque el espacio mismo se está estirando, no tiene que haber ningún punto especial - ningún centavo especial, ninguna galaxia especial - que sea el centro del movimiento hacia afuera. Cada punto, cada centavo, cada galaxia, está completamente a la par con las demás. La vista desde cualquier lugar *parece* la vista desde el centro de una explosión: cada Lincoln ve a todos los demás Lincolns alejándose rápidamente; un observador, como nosotros, en cualquier galaxia ve a todas las demás galaxias alejándose rápidamente. Pero como esto es cierto para todos los lugares, no hay un lugar especial o único que sea *el* centro desde el cual el movimiento hacia afuera está emanando.

Además, esta explicación no sólo explica cualitativamente el movimiento hacia afuera de las galaxias de una manera espacialmente homogénea, sino que también explica los detalles cuantitativos encontrados por el Hubble y confirmados con mayor precisión por observaciones posteriores. Como se ilustra en la Figura 8.2b, si el globo se hincha durante algún intervalo de tiempo, doblando su tamaño por ejemplo, todas las separaciones espaciales se doblarán también en tamaño: los peniques que estaban a 1 pulgada de distancia estarán ahora a 2 pulgadas de distancia, los peniques que estaban a 2 pulgadas de distancia estarán ahora a 4 pulgadas de distancia, los peniques que estaban a 3 pulgadas de distancia estarán ahora a 6 pulgadas de distancia, y así sucesivamente. Por lo tanto, en cualquier intervalo de tiempo, el aumento de la separación entre dos peniques es proporcional a la distancia inicial entre ellos. Y como un mayor aumento de la separación durante un intervalo de tiempo dado significa una mayor velocidad, los peniques que están más lejos uno del otro se separan más rápidamente. En esencia, cuanto más lejos estén dos peniques, más superficie del globo hay entre ellos, y por lo tanto más rápido se separan cuando se hinchan. Aplicando exactamente el mismo razonamiento a la expansión del espacio y las galaxias que contiene, obtenemos una explicación para las observaciones de Hubble. Cuanto más lejos están dos galaxias, más espacio hay entre ellas, así que cuanto más rápido se alejan unas de otras cuando el espacio se hincha.

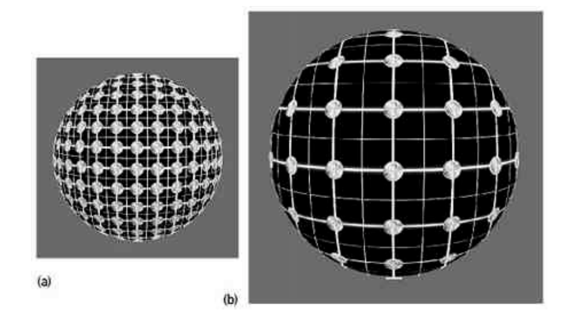


Figura 8.2 **(** a **)** Si se pegan centavos uniformemente espaciados a la superficie de una esfera, la vista que ve cualquier Lincoln es la misma que la de cualquier otro. Esto se alinea con la creencia de que la vista desde cualquier galaxia del universo, en promedio, es la misma que la vista desde cualquier otra. **)** Si la esfera se expande, las distancias entre todos los centavos aumentan. Además, cuanto más separados estén dos peniques en 8.2a, mayor será la separación que experimenten de la expansión en 8.2b. Esto se ajusta bien a las mediciones que muestran que cuanto más lejos de un punto de vista determinado esté una galaxia, más rápido se aleja de ese punto. Al atribuir el movimiento observado de las galaxias a la expansión del espacio, la relatividad general proporciona una explicación que no sólo trata todas las ubicaciones en el espacio simétricamente, sino que también da cuenta de todos los datos del Hubble de una sola vez. Es este tipo de explicación, una que elegantemente se sale de la caja (en este caso, una que realmente *utiliza* el espacio "caja", es decir) para explicar las observaciones con precisión cuantitativa y simetría ingeniosa, que los físicos describen como casi demasiado bella para estar equivocada. Existe un acuerdo esencialmente universal de que el tejido del espacio se está estirando.

El tiempo en un universo en expansión

Utilizando una ligera variación del modelo del globo, podemos ahora comprender con mayor precisión cómo la simetría en el espacio, a pesar de que el espacio se está expandiendo, produce una noción de tiempo que se aplica uniformemente en todo el cosmos. Imaginemos que reemplazamos cada centavo por un reloj idéntico, como en la figura 8.3. Sabemos por la relatividad que los relojes idénticos marcarán el tiempo a ritmos diferentes si están sujetos a diferentes influencias físicas: movimientos diferentes o campos gravitatorios diferentes. Pero la simple pero clave observación es que la completa simetría entre todos los Lincolns del globo inflable se traduce en una completa simetría entre todos los relojes. Todos los relojes experimentan condiciones físicas idénticas, así que todos marcan exactamente la misma velocidad y registran cantidades idénticas de tiempo transcurrido. De manera similar, en un universo en expansión en el que hay un alto grado de simetría entre todas las galaxias, *los relojes que se mueven a lo*

largo de una u otra galaxia también deben funcionar a la misma velocidad y por lo tanto registrar una cantidad idéntica de tiempo transcurrido. ¿Cómo podría ser de otra manera? Cada reloj está a la par de los demás, habiendo experimentado, en promedio, condiciones físicas casi idénticas. Esto muestra de nuevo el asombroso poder de la simetría. Sin ningún cálculo o análisis detallado, nos damos cuenta de que la uniformidad del entorno físico, como se evidencia en la uniformidad de la radiación de fondo de microondas y la distribución uniforme de las galaxias en todo el espacio, [8] nos permite inferir la uniformidad del tiempo.

Aunque el razonamiento aquí es sencillo, la conclusión puede sin embargo ser confusa. Dado que las galaxias se están separando rápidamente a medida que el espacio se expande, los relojes que se mueven a lo largo de una u otra galaxia también se están separando rápidamente. Es más, se están moviendo entre sí a una enorme variedad de velocidades determinadas por la enorme variedad de distancias entre ellas. ¿Este movimiento no causará que los relojes se desincronicen, como nos enseñó Einstein con la relatividad especial? Por varias razones, la respuesta es no; aquí hay una forma particularmente útil de pensar en ello.

Recordemos que Einstein descubrió que los relojes que se mueven *a través del* espacio de diferentes maneras marcan el tiempo a diferentes velocidades (porque desvían diferentes cantidades de su movimiento a través del tiempo hacia el movimiento a través del espacio; recordemos la analogía con Bart en su patineta, primero dirigiéndose al norte y luego desviando parte de su movimiento hacia el este). Pero los relojes que estamos discutiendo ahora *no se mueven* a través del espacio en absoluto. Así como cada centavo está pegado a un punto del globo y sólo se mueve en relación con otros centavos debido a la hinchazón de la superficie del globo, cada galaxia ocupa una región del espacio y, en su mayor parte, sólo se mueve en relación con otras galaxias debido a la expansión del espacio. Y esto significa que, con respecto al espacio mismo, todos los relojes son en realidad estacionarios, por lo que marcan el tiempo de forma idéntica. Son precisamente estos relojes *-relojes cuyo único movimiento proviene de la expansión del espacio- los* que proporcionan los relojes cósmicos sincronizados utilizados para medir la edad del universo.

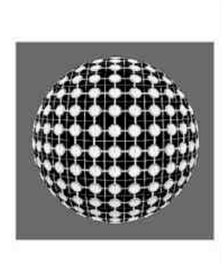
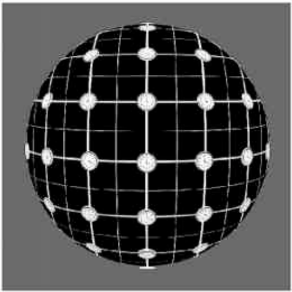



Figura 8.3 Los relojes que se mueven junto con las galaxias -cuyo movimiento, en promedio, surge sólo de la expansión del espacio- proporcionan relojes cósmicos universales. Se mantienen sincronizados aunque se separen unos de otros, ya que se mueven *con* el espacio pero no *a través de él*.

Note, por supuesto, que es libre de tomar su reloj, subir a bordo de un cohete, y viajar a través del espacio a enormes velocidades, experimentando un movimiento significativamente mayor que el flujo cósmico de la expansión espacial. Si haces esto, tu reloj *funcionará* a una velocidad diferente y *encontrarás* una longitud diferente de tiempo transcurrido desde el estallido. Este es un punto de vista perfectamente válido, pero es completamente individualista: el tiempo transcurrido medido está ligado a la historia de tu paradero y estados de movimiento particulares. Sin embargo, cuando los astrónomos hablan de la edad del universo, están buscando algo universal: buscan una medida que tenga el mismo significado en todas partes. La uniformidad del cambio en todo el espacio proporciona una forma de hacerlo.[9]

De hecho, la uniformidad de la radiación de fondo de microondas proporciona una prueba ya preparada de si realmente se está moviendo con el flujo cósmico del espacio. Verá, aunque la radiación de microondas es homogénea a través del espacio, si realiza un movimiento adicional más allá del del flujo cósmico de expansión espacial, no observará que la radiación sea homogénea. Al igual que la bocina de un coche que va a toda velocidad tiene un tono más alto cuando se acerca y un tono más bajo cuando retrocede, si usted está dando vueltas en una nave espacial, las crestas y los canales de las microondas que se dirigen hacia la parte delantera de su nave chocarán a una frecuencia más alta que las que viajan hacia la parte trasera de su nave. Las microondas de mayor frecuencia se traducen en temperaturas más altas, por lo que la radiación en la dirección en la que se dirige será un poco más cálida que la que llega por detrás. Resulta que aquí en la Tierra, en una "nave espacial", los astrónomos encuentran que el fondo de microondas es un poco más cálido en una dirección del espacio y un poco más frío en la dirección opuesta. La razón es que no sólo la tierra se mueve alrededor del sol, y el sol se mueve alrededor del centro galáctico, sino que toda la galaxia de la Vía Láctea tiene una pequeña velocidad, superior a la expansión cósmica, hacia la constelación de Hydra. Sólo cuando los astrónomos corrigen el efecto que estos movimientos adicionales relativamente leves tienen sobre las microondas que recibimos, la radiación exhibe la exquisita uniformidad de temperatura entre una parte del cielo y otra. Es esta uniformidad, esta simetría general entre un lugar y otro, lo que nos permite hablar con sensatez del tiempo cuando describimos el universo entero.

Características sutiles de un universo en expansión

Algunos puntos sutiles en nuestra explicación de la expansión cósmica son dignos de ser resaltados. Primero, recuerde que en la metáfora del globo, es sólo la *superficie del* globo la que juega un papel, una superficie que es sólo bidimensional (cada ubicación puede especificarse dando dos números análogos a la latitud y la longitud en la tierra), mientras que el espacio que vemos cuando miramos alrededor tiene tres dimensiones. Hacemos uso de este modelo de menor dimensión porque conserva los conceptos esenciales para la verdadera historia tridimensional, pero es mucho más fácil de visualizar. Es importante tener esto en cuenta, especialmente si se ha tenido la tentación de decir que *hay* un punto especial en el modelo del globo: el punto central en el interior del globo del que se aleja toda la superficie de goma. Si bien esta observación es cierta, no tiene sentido en la analogía del globo porque cualquier punto que no esté en la superficie del globo no juega ningún papel. La superficie del globo representa *todo el* espacio; los puntos que no se encuentran en la superficie del globo son meramente subproductos irrelevantes de la analogía y no corresponden a ningún lugar del universo. [19]

En segundo lugar, si la velocidad de recesión es cada vez mayor para las galaxias que están cada vez más lejos, ¿no significa eso que las galaxias que están suficientemente distantes se alejarán de nosotros a una velocidad mayor que la de la luz? La respuesta es un rotundo y definitivo sí. Sin embargo, no hay conflicto con la relatividad especial. ¿Por qué? Bueno, está estrechamente relacionado con la razón por la que los relojes que se alejan debido al flujo cósmico del espacio permanecen sincronizados. Como enfatizamos en el capítulo 3, Einstein demostró que nada puede moverse *por el* espacio más rápido que la luz. Pero las galaxias, en promedio, apenas se mueven por el espacio. Su movimiento se debe casi completamente al estiramiento *del espacio mismo.* Y la teoría de Einstein no prohíbe que el espacio se expanda de manera que impulse a dos puntos, dos galaxias, alejadas entre sí a una velocidad superior a la de la luz. Sus resultados sólo limitan las velocidades para las que se ha restado el movimiento de la expansión espacial, el movimiento en exceso del que surge de la expansión espacial. Las observaciones confirman que para las galaxias típicas que se desplazan en zigzag junto con el flujo cósmico, ese exceso de movimiento es mínimo, en plena consonancia con la relatividad especial, aunque su movimiento relativo entre sí, derivado de la hinchazón del propio espacio, pueda exceder la velocidad de la luz.[20]

Tercero, si el espacio se expande, ¿no significaría que además de que las galaxias se alejan unas de otras, el espacio creciente dentro de cada galaxia haría que todas sus estrellas se alejaran más, y el espacio creciente dentro de cada estrella, y dentro de cada planeta, y dentro de ti y de mí y de todo lo demás, haría que todos los átomos constituyentes se alejaran más, y el espacio creciente dentro de cada átomo haría que todos los constituyentes subatómicos se alejaran más? En resumen, ¿la hinchazón del espacio no causaría que *todo creciera* en tamaño, incluyendo nuestras varas de medir, y de esa manera hacer imposible discernir

que cualquier expansión ha ocurrido realmente? La respuesta: no. Piensa de nuevo en el modelo de globo y centavo. A medida que la superficie del globo se hincha, todos los peniques se separan, pero los peniques en sí mismos seguramente no se expanden. Por supuesto, si hubiéramos representado las galaxias con pequeños círculos dibujados en el globo con un marcador negro, entonces, de hecho, como el globo creció en tamaño los pequeños círculos también crecerían. Pero los centavos, no los círculos ennegrecidos, capturan lo que realmente sucede. Cada centavo se mantiene fijo en tamaño porque las fuerzas que mantienen sus átomos de zinc y cobre juntos son mucho más fuertes que el tirón hacia afuera del globo en expansión al que está pegado. De manera similar, la fuerza nuclear que mantiene unidos los átomos individuales, y la fuerza electromagnética que mantiene unidos los huesos y la piel, y la fuerza gravitacional que mantiene intactos y unidos a los planetas y estrellas en las galaxias, son más fuertes que la hinchazón externa del espacio, y por lo tanto ninguno de estos objetos se expande. Sólo en la mayor de las escalas, en escalas mucho más grandes que las galaxias individuales, la hinchazón del espacio encuentra poca o ninguna resistencia (la atracción gravitatoria entre galaxias ampliamente separadas es comparativamente pequeña, debido a las grandes separaciones involucradas) y así sólo en tales escalas super galácticas la hinchazón del espacio aleja los objetos.

La cosmología, la simetría y la forma del espacio

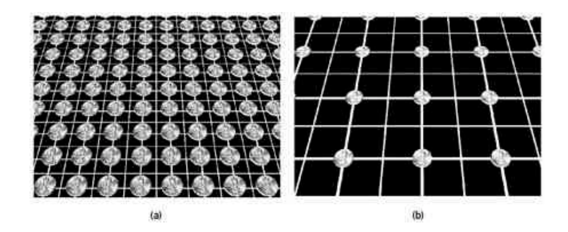
Si alguien te despertara en medio de la noche de un sueño profundo y te exigiera que le dijeras la forma del universo -la forma general del espacio- te resultaría difícil responder. Incluso en tu estado de aturdimiento, sabes que Einstein demostró que el espacio es como una especie de Silly Putty y así, en principio, puede tomar prácticamente cualquier forma. ¿Cómo, entonces, puedes responder a la pregunta de tu interrogador? Vivimos en un pequeño planeta que orbita alrededor de una estrella promedio en las afueras de una galaxia que no es más que una de los cientos de miles de millones dispersos por el espacio, así que ¿cómo se puede esperar que sepas algo sobre la forma del universo entero? Bueno, a medida que la niebla del sueño comienza a levantarse, te das cuenta gradualmente que el poder de la simetría una vez más viene al rescate.

Si se tiene en cuenta la creencia generalizada de los científicos de que, en los promedios a gran escala, todas las ubicaciones y todas las direcciones del universo están simétricamente relacionadas entre sí, entonces se está bien encaminado para responder a la pregunta del interrogador. La razón es que casi todas las formas *no cumplen* este criterio de simetría, porque una parte o región de la forma difiere fundamentalmente de otra. Una pera sobresale significativamente en la parte inferior pero menos en la superior; un huevo es más plano en el medio pero más puntiagudo en sus extremos. Estas formas, aunque

exhiben cierto grado de simetría, no poseen una simetría completa. Al descartar tales formas, y limitarse sólo a aquellas en las que cada región y dirección es como cualquier otra, se pueden reducir las posibilidades fantásticamente.

Ya hemos encontrado una forma que se ajusta al perfil. La forma esférica del globo fue el ingrediente clave para establecer la simetría entre todos los Lincoln en su superficie de expansión, y por lo tanto la versión tridimensional de esta forma, la llamada triesfera*,* es un candidato para la forma del espacio. Pero esta no es la única forma que produce una simetría completa. Continuando con el razonamiento de los modelos bidimensionales más fácilmente visualizados, imaginemos una hoja de goma *infinitamente ancha* e *infinitamente* larga, completamente sin curvar, con centavos uniformemente espaciados pegados a su superficie. A medida que la hoja entera se expande, hay una vez más una completa simetría espacial y una completa consistencia con el descubrimiento de Hubble: cada Lincoln ve a todos los demás Lincoln salir corriendo con una velocidad proporcional a su distancia, como en la figura 8.4. Por lo tanto, una versión tridimensional de esta forma, como un cubo de goma transparente en expansión infinita con galaxias uniformemente salpicadas en todo su interior, es otra forma posible para el espacio. (Si prefiere las metáforas culinarias, piense en una versión infinitamente grande del panecillo de semillas de amapola mencionado anteriormente, una que tiene forma de cubo pero que continúa para siempre, con las semillas de amapola desempeñando el papel de galaxias. A medida que el muffin se hornea, la masa se expande, causando que cada semilla de amapola se aleje de las otras). Esta forma se llama *espacio plano* porque, a diferencia del ejemplo esférico, no tiene curvatura (un significado de "plano" que utilizan los matemáticos y físicos, pero que difiere del significado coloquial de "en forma de panqueque"). [11]

Una cosa buena de las formas esféricas e infinitamente planas es que puedes caminar sin parar y nunca llegar a un borde o a un límite. Esto es atractivo porque nos permite evitar preguntas espinosas: ¿Qué hay más allá del borde del espacio? ¿Qué sucede si caminas hacia un límite del espacio? Si el espacio no tiene bordes o límites, la pregunta no tiene sentido. Pero noten que las dos formas se dan cuenta de esta característica atractiva de diferentes maneras. Si caminas en línea recta en un espacio de forma esférica, encontrarás, como Magallanes, que tarde o temprano regresas a tu punto de partida, sin haber encontrado nunca un borde. Por el contrario, si caminas en línea recta en un espacio plano infinito, descubrirás que, como el Conejo de Energizer, puedes seguir adelante y seguir adelante, sin encontrar nunca un borde, pero tampoco volver nunca al punto de partida de tu viaje. Aunque esto podría parecer una diferencia fundamental entre la geometría de una forma curva y una plana, hay una simple variación en el espacio plano que se asemeja sorprendentemente a la esfera en este sentido.



La vista desde cualquier centavo en un plano plano plano infinito es la misma que la vista desde cualquier otro. Cuanto más separados estén dos peniques en la figura 8.4a, mayor será el aumento de su separación cuando el plano se expanda.

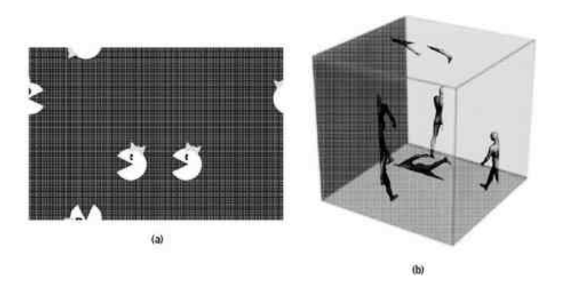


Figura 8.5 **(** a **) La pantalla de un videojuego** es plana (en el sentido de "no curvada") y tiene un tamaño finito, pero no contiene bordes o límites ya que "se envuelve". Matemáticamente, tal forma se llama un *toro bidimensional.* Una versión tridimensional de la misma forma, llamada toro tridimensional, también es plana (en el sentido de "no curvada") y tiene un volumen finito, pero tampoco tiene bordes o límites, ya que se envuelve. Si pasas por una cara, entras en la cara opuesta.

Para imaginárselo, piense en uno de esos videojuegos en los que la pantalla parece tener bordes pero en realidad no los tiene, ya que en realidad no puede caerse: si se mueve del borde derecho, reaparece en el izquierdo; si se mueve del borde superior, reaparece en el inferior. La pantalla se "envuelve", identificando la parte superior con la inferior y la izquierda con la derecha, y de esa forma la forma es plana (sin curvatura) y tiene un tamaño finito, pero no tiene bordes. Matemáticamente, esta forma se llama *toro bidimensional; se ilustra* en la figura 8.5a. [12] La versión tridimensional de esta forma -un toro tridimensional- proporciona otra posible forma para el tejido del espacio. Podemos pensar en esta forma como un enorme cubo que se envuelve a lo largo de los tres ejes: cuando se camina por la parte superior se reaparece en la parte inferior, cuando se camina por la parte posterior, se reaparece en la parte delantera, cuando se camina por la parte izquierda, se reaparece en la parte derecha, como en la figura 8.5b. Tal forma es plana de nuevo, en el sentido de no estar curvada, no en el sentido de ser como una tortita tridimensional, finita en todas las direcciones, y sin embargo no tiene bordes ni límites.

Más allá de estas posibilidades, hay todavía otra forma consistente con la explicación del espacio de expansión simétrica para el descubrimiento del Hubble. Aunque es difícil de imaginar en tres dimensiones, como en el ejemplo esférico hay un buen sustituto bidimensional: una versión infinita de una patata frita de Pringle. Esta forma, a menudo llamada *,* es una especie de inverso de la esfera: Mientras que una esfera está simétricamente hinchada hacia fuera, la silla se encoge simétricamente hacia dentro, como se ilustra en la figura 8.6. Utilizando un poco de terminología matemática, decimos que la esfera tiene una curvatura *positiva* (se hincha hacia fuera), la silla tiene una curvatura *negativa* (se encoge hacia dentro), y el espacio plano -ya sea infinito o finito- *no* tiene ninguna *curvatura* (no se hincha ni se encoge). [21]

Los investigadores han demostrado que esta lista -uniformemente positiva, negativa o nula- agota las posibles curvaturas del espacio que son consistentes con el requisito de simetría entre todas las ubicaciones y en todas las direcciones. Y eso es realmente asombroso. Estamos hablando de la forma del *universo entero,* algo para lo que hay infinitas posibilidades. Sin embargo, al invocar el inmenso poder de la simetría, los investigadores han sido capaces de estrechar las posibilidades de forma aguda. Y así, si permites que la simetría guíe tu respuesta, y tu interrogador nocturno te concede un mero puñado de conjeturas, serás capaz de afrontar su reto. [13]

De todos modos, se preguntarán por qué hemos encontrado una variedad de formas posibles para el tejido del espacio. Habitamos un solo universo, así que ¿por qué no podemos especificar una forma única? Bueno, las formas que hemos enumerado son las únicas coherentes con nuestra creencia de que cada observador, independientemente del lugar del universo en el que se encuentren, debería ver en la mayor de las escalas un cosmos idéntico. Pero tales consideraciones de simetría, aunque muy selectivas, no son capaces de ir hasta el final y elegir una respuesta única. Para ello necesitamos las ecuaciones de Einstein de la relatividad general.

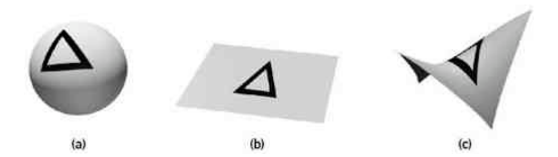


Figura 8.6 Utilizando la analogía bidimensional para el espacio, hay tres tipos de curvatura que son completamente simétricas, es decir, curvaturas en las que la vista desde cualquier lugar es la misma que la de cualquier otro. Se trata de**:** a**)** la curvatura *positiva*, que se hincha uniformemente hacia fuera, como en una esfera; b**) la curvatura** *cero*, que no se hincha en absoluto, como en un plano infinito o en una pantalla de videojuegos finita; c**)** la curvatura *negativa*, que se encoge uniformemente hacia dentro, como en una silla de montar.

Como entrada, las ecuaciones de Einstein toman la cantidad de materia y energía del universo (que se supone, de nuevo por consideración de la simetría, que se distribuye uniformemente) y como salida, dan la curvatura del espacio. La dificultad es que durante muchos decenios los astrónomos no han podido ponerse de acuerdo sobre cuánta materia y energía hay realmente. Si toda la materia y energía del universo se esparciera uniformemente por el espacio, y si, después de hacerlo, resultara haber más que la llamada densidad crítica de alrededor de .0000000000000000000001 (10^{-23}) gramos en cada metro cúbico [22] -alrededor de cinco átomos de hidrógeno por metro cúbico- las ecuaciones de Einstein producirían una curvatura positiva para el espacio; si hubiera menos que la densidad crítica, las ecuaciones implicarían una curvatura negativa; si hubiera exactamente la densidad crítica, las ecuaciones nos dirían que el espacio no tiene una curvatura global. Aunque esta cuestión de la observación aún no se ha resuelto definitivamente, los datos más refinados están inclinando la balanza del lado de la no curvatura: la forma plana. Pero la pregunta de si el Conejo de Energizer podría moverse para siempre en una dirección y desvanecerse en la oscuridad, o si un día daría vueltas y te atraparía por detrás, ya sea que el espacio continúe para siempre o se envuelva como una pantalla de video, sigue estando completamente abierta.[14]

Aún así, incluso sin una respuesta final a la forma del tejido cósmico, lo que está abundantemente claro es que la simetría es *la* consideración esencial que nos permite comprender el espacio y el tiempo cuando se aplica al universo en su conjunto. Sin invocar el poder de la simetría, estaríamos estancados en el punto de partida.

La cosmología y el espacio tiempo

Ahora podemos ilustrar la historia cósmica combinando el concepto de expansión del espacio con la descripción del espacio tiempo del capítulo 3. Recuerden que en la descripción de la barra de pan, cada trozo -aunque sea bidimensional- representa todo el espacio tridimensional en un solo momento del tiempo desde la perspectiva de un observador particular. Diferentes observadores cortan el pan en diferentes ángulos, dependiendo de los detalles de su movimiento relativo. En los ejemplos encontrados anteriormente, no tuvimos en cuenta la expansión del espacio y, en cambio, imaginamos que el tejido del cosmos estaba fijo e inalterable a lo largo del tiempo. Ahora podemos refinar esos ejemplos incluyendo la evolución cosmológica.

Para ello, tomaremos la perspectiva de los observadores que están en reposo con respecto al espacio, es decir, observadores cuyo único movimiento surge de la expansión cósmica, al igual que los Lincoln pegados al globo. Una vez más, aunque se muevan unos respecto a otros, hay simetría entre todos esos

observadores -sus relojes están todos de acuerdo- y por eso cortan el pan del espacio tiempo exactamente de la misma manera. Sólo un movimiento relativo superior al que proviene de la expansión espacial, sólo un movimiento relativo *a través del* espacio en contraposición al movimiento *del espacio en expansión, daría como resultado que sus relojes* se desincronizaran y que sus trozos de pan espacial estuvieran en ángulos diferentes. También necesitamos especificar la forma del espacio, y para propósitos de comparación consideraremos algunas de las posibilidades discutidas anteriormente.

El ejemplo más fácil de dibujar es la forma plana y finita, la forma del videojuego. En la figura 8.7a, mostramos una porción en tal universo, una imagen esquemática que debe considerarse que representa todo el espacio en este momento. Para simplificar, imagina que nuestra galaxia, la Vía Láctea, está en el centro de la figura, pero ten en cuenta que ningún lugar es de ninguna manera especial comparado con ningún otro. Incluso los bordes son ilusorios. La parte superior no es un lugar donde el espacio termina, ya que se puede atravesar y reaparecer en la parte inferior; de manera similar, el lado izquierdo no es un lugar donde el espacio termina, ya que se puede atravesar y reaparecer en el lado derecho. Para acomodar las observaciones astronómicas, cada lado debería extenderse al menos 14.000 millones de años luz desde su punto medio, pero cada uno podría ser mucho más largo.

Obsérvese que ahora mismo no podemos ver literalmente las estrellas y galaxias tal como están dibujadas en este trozo de *ahora, ya que*, como discutimos en el capítulo 5, la luz emitida por cualquier objeto ahora mismo tarda en llegar a nosotros. En cambio, la luz que vemos cuando miramos hacia arriba en una noche clara y oscura fue emitida hace mucho tiempo -millones e incluso miles de millones de años- y sólo ahora ha completado el largo viaje a la Tierra, entró en nuestros telescopios y nos permitió maravillarnos con las maravillas del espacio profundo. Dado que el espacio se está expandiendo, hace eones, cuando se emitió esta luz, el universo era mucho más pequeño. Ilustramos esto en la Figura 8.7b en la que hemos puesto nuestro actual trozo de *ahora en* el lado derecho del pan e incluimos una secuencia de trozos a la izquierda que representan nuestro universo en momentos de tiempo cada vez más tempranos. Como podéis ver, el tamaño total del espacio y las separaciones entre las galaxias individuales disminuyen a medida que miramos al universo en momentos cada vez más tempranos.

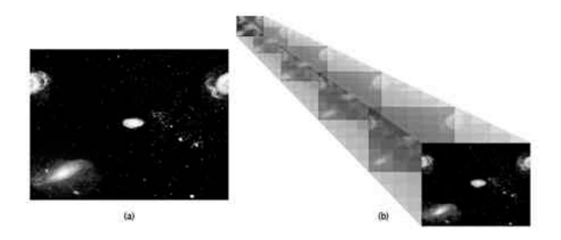


Figura 8.7 Una imagen esquemática que representa todo el espacio en este momento, suponiendo que el espacio es plano y de extensión finita, es decir, con forma de pantalla de videojuego. Obsérvese que la galaxia en la parte superior derecha se envuelve en la izquierda. Una imagen esquemática que representa todo el espacio a medida que evoluciona a través del tiempo, con algunos fragmentos de tiempo resaltados para mayor claridad. Obsérvese que el tamaño total del espacio y la separación entre galaxias disminuyen a medida que miramos más atrás en el tiempo.

En la figura 8.8, también se puede ver la historia de la luz, emitida por una galaxia lejana hace quizás mil millones de años, mientras ha viajado hacia nosotros aquí en la Vía Láctea. En el trozo inicial de la figura 8.8a, la luz se emite primero, y en los trozos siguientes se puede ver la luz acercándose cada vez más, incluso a medida que el universo se hace más y más grande, y finalmente se puede ver que nos llega en el trozo de tiempo más a la derecha. En la figura 8.8b, al conectar las ubicaciones en cada rebanada por las que pasó el borde delantero de la luz durante su viaje, mostramos el camino de la luz a través del espacio tiempo. Como recibimos luz de muchas direcciones, la figura 8.8c muestra una muestra de las trayectorias a través del espacio y el tiempo que varios haces de luz tardan en llegar a nosotros ahora.

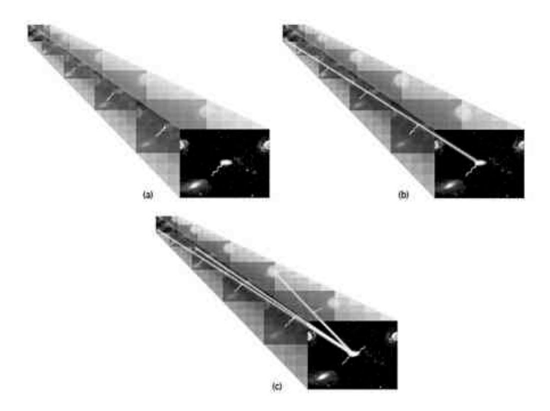


Figura 8.8 La luz emitida hace mucho tiempo desde una galaxia distante se acerca cada vez más a la Vía Láctea en rebanadas de tiempo posteriores. Cuando finalmente vemos la galaxia distante, la miramos a través del espacio y el tiempo, ya que la luz que vemos fue emitida hace mucho tiempo. El camino a través del espacio tiempo seguido por la luz está resaltado. Los caminos a través del espacio

tiempo tomados por la luz emitida por varios cuerpos astronómicos que vemos hoy en día.

Las figuras muestran dramáticamente cómo la luz del espacio puede ser usada como una cápsula de tiempo cósmica. Cuando miramos la galaxia de Andrómeda, la luz que recibimos fue emitida hace unos 3 millones de años, así que estamos viendo a Andrómeda como era en el pasado lejano. Cuando miramos al cúmulo Coma, la luz que recibimos fue emitida hace unos 300 millones de años y por lo tanto estamos viendo el cúmulo Coma como era en una época aún más temprana. Si ahora mismo todas las estrellas de todas las galaxias de este cúmulo se convirtieran en supernovas, seguiríamos viendo la misma imagen intacta del cúmulo Coma y lo haríamos durante otros 300 millones de años; sólo entonces la luz de las estrellas en explosión habría tenido suficiente tiempo para llegar a nosotros. De manera similar, si un astrónomo del cúmulo de Coma que está en nuestro actual corte gira un telescopio superpoderoso hacia la Tierra, verá una abundancia de helechos, artrópodos y reptiles primitivos; no verá la Gran Muralla China o la Torre Eiffel hasta dentro de casi otros 300 millones de años. Por supuesto, esta astrónoma, bien entrenada en cosmología básica, se da cuenta de que está viendo la luz emitida en el pasado distante de la Tierra, y al diseñar su propio pan cósmico espacio-tiempo asignará las primeras bacterias de la Tierra a su época apropiada, su conjunto apropiado de rebanadas de tiempo.

Todo esto supone que tanto nosotros como el astrónomo del cúmulo de Coma nos movemos sólo con el flujo cósmico de la expansión espacial, ya que esto asegura que su rebanada del pan del espacio tiempo coincide con la nuestra, y asegura que su lista actual coincide con la nuestra. Sin embargo, si ella rompe filas y se mueve a través del espacio sustancialmente por encima del flujo cósmico, sus rebanadas se inclinarán en relación con las nuestras, como en la figura 8.9. En este caso, como encontramos con Chewie en el capítulo 5, el *ahora* de este astrónomo coincidirá con lo que consideramos que es nuestro futuro o nuestro pasado (dependiendo de si el movimiento adicional es hacia o lejos de nosotros). Noten, sin embargo, que sus rebanadas ya no serán espacialmente homogéneas. Cada rebanada angular de la figura 8.9 intersecta el universo en un rango de diferentes épocas y por lo tanto las rebanadas están lejos de ser uniformes. Esto complica significativamente la descripción de la historia cósmica, por lo que los físicos y astrónomos generalmente no contemplan tales perspectivas. En cambio, suelen considerar sólo la perspectiva de los observadores que se mueven únicamente con el flujo cósmico, ya que esto da lugar a rodajas que son homogéneas, pero fundamentalmente hablando, cada punto de vista es tan válido como cualquier otro.

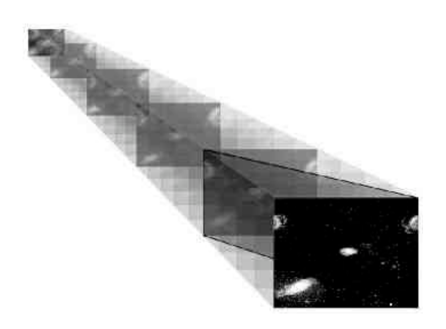


Figura 8.9 La porción de tiempo de un observador que se mueve significativamente por encima del flujo cósmico de la expansión espacial.

A medida que miramos más a la izquierda en el pan cósmico espacio-tiempo, el universo se hace cada vez más pequeño y más denso. Y al igual que un neumático de bicicleta se calienta más y más a medida que se introduce más y más aire en él, el universo se calienta más y más a medida que la materia y la radiación son comprimidas más y más fuertemente por la contracción del espacio. Si volvemos a una mera diez millonésima de segundo después del comienzo, el universo se vuelve tan denso y tan caliente que la materia ordinaria se desintegra en un plasma primordial de los constituyentes elementales de la naturaleza. Y si continuamos nuestro viaje, hasta casi el mismo tiempo cero -el tiempo del *big bang*- todo el universo conocido se comprime hasta un tamaño que hace que el punto al final de esta frase parezca gigantesco. Las densidades en una época tan temprana eran tan grandes, y las condiciones tan extremas, que las teorías físicas más refinadas que tenemos actualmente son incapaces de darnos una idea de lo que pasó. Por razones que serán cada vez más claras, las leyes de la física altamente exitosas desarrolladas en el siglo XX se rompen en condiciones tan intensas, dejándonos sin timón en nuestra búsqueda por entender el comienzo del tiempo. Pronto veremos que los recientes desarrollos están proporcionando un faro de esperanza, pero por ahora reconocemos nuestra comprensión incompleta de lo que ocurrió al principio poniendo un parche borroso en el extremo izquierdo del pan cósmico espacio-tiempo - nuestro versículo de la terra incognita en los mapas de antaño. Con este toque final, presentamos la Figura 8.10 como una ilustración a grandes rasgos de la historia cósmica.

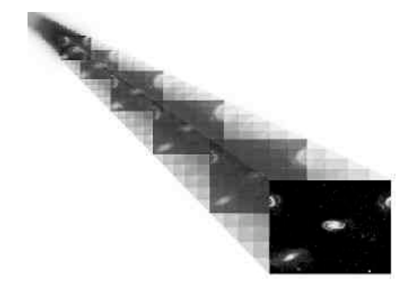


Figura 8.10 Historia cósmica - el "pan" del espacio tiempo - para un universo que es plano y de extensión espacial finita. La borrosidad en la parte superior denota nuestra falta de comprensión cerca del comienzo del universo.

Formas alternativas

Hasta ahora hemos asumido que el espacio tiene la forma de una pantalla de videojuego, pero la historia tiene muchas de las mismas características para las otras posibilidades. Por ejemplo, si los datos muestran finalmente que la forma del espacio es esférica, entonces, a medida que retrocedemos más en el tiempo, el tamaño de la esfera se hace cada vez más pequeño, el universo se hace cada vez más caliente y más denso, y en el tiempo cero nos encontramos con una especie de comienzo de big bang. Dibujar una ilustración análoga a la figura 8.10 es un reto, ya que las esferas no se apilan ordenadamente una al lado de la otra (se puede, por ejemplo, imaginar un "pan esférico" en el que cada trozo es una esfera que rodea a la anterior), pero aparte de las complicaciones gráficas, la física es en gran medida la misma.

Los casos del espacio plano infinito y del espacio infinito en forma de silla de montar también comparten muchas características con las dos formas ya discutidas, pero difieren en una forma esencial. Echemos un vistazo a la figura 8.11, en la que los trozos representan el espacio plano que se prolonga para siempre (del que sólo podemos mostrar una parte, por supuesto). A medida que observamos épocas cada vez más tempranas, el espacio se encoge; las galaxias se acercan cada vez más entre sí cuanto más atrás miramos en la Figura 8.11b. Sin embargo, el tamaño total del espacio permanece igual. ¿Por qué? Bueno, el infinito es algo curioso. Si el espacio es infinito y se reducen todas las distancias en un factor de dos, el tamaño del espacio se convierte en la mitad del infinito, y eso sigue siendo infinito. Así que aunque todo se acerca más y las densidades son cada vez más altas a medida que retrocedes en el tiempo, el tamaño general del universo sigue siendo infinito; las cosas se vuelven densas en todas partes en una expansión espacial infinita. Esto da una imagen bastante diferente del Big Bang.

Normalmente, imaginamos que el universo comenzó como un punto, más o menos como en la figura 8.10, en el que no hay espacio o tiempo exterior. Luego, a partir de algún tipo de erupción, el espacio y el tiempo se desplegaron de su forma comprimida y el universo en expansión tomó vuelo. Pero si el universo es espacialmente infinito, *ya había una expansión espacial infinita en el momento del big bang.* En ese momento inicial, la densidad de energía se disparó y se alcanzó una temperatura incomparablemente grande, pero estas condiciones extremas existían en todas partes, no sólo en un único punto. En este escenario, el big bang no tuvo lugar en un solo punto; en cambio, la erupción del big bang tuvo lugar *en*

toda la extensión infinita. Comparando esto con el comienzo convencional de un solo punto, es como si hubiera muchos big bangs, uno en cada punto de la expansión espacial infinita. Después del estallido, el espacio se hinchó, pero su tamaño total no aumentó ya que algo ya infinito no puede crecer más. Lo que sí aumentó son las separaciones entre objetos como galaxias (una vez que se formaron), como se puede ver mirando de izquierda a derecha en la Figura 8.11b. Un observador como tú o yo, mirando desde una galaxia u otra, vería que las galaxias circundantes se alejan rápidamente, tal como descubrió Hubble.

Tenga en cuenta que este ejemplo de espacio plano infinito es mucho más que académico. Veremos que cada vez hay más pruebas de que la forma general del espacio no es curva, y como todavía no hay pruebas de que el espacio tenga una forma de videojuego, la forma espacial plana e infinitamente grande es la competidora principal de la estructura a gran escala del espacio tiempo.

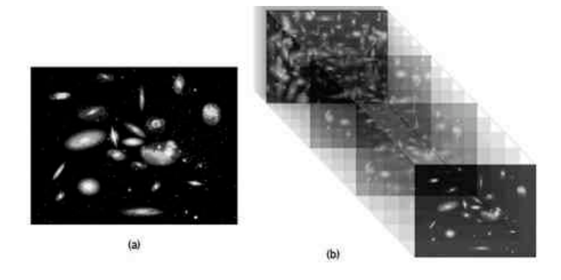


Figura 8.11 Representación esquemática del espacio infinito, poblado por galaxias. El espacio se reduce en tiempos cada vez más tempranos, de modo que las galaxias están más cerca y más densamente empaquetadas en tiempos anteriores, pero el tamaño total del espacio infinito sigue siendo infinito. Nuestra ignorancia de lo que sucede en los primeros tiempos se denota de nuevo por una mancha borrosa, pero aquí la mancha se extiende a través de la expansión espacial infinita.

Cosmología y Simetría

Las consideraciones de simetría han sido claramente indispensables en el desarrollo de la teoría cosmológica moderna. El significado del tiempo, su aplicabilidad al universo en su conjunto, la forma general del espacio e incluso el marco subyacente de la relatividad general, todo ello descansa sobre los fundamentos de la simetría. Aún así, hay otra forma en que las ideas de simetría han informado al cosmos en evolución. A lo largo de su historia, la temperatura del universo ha variado enormemente, desde los feroces momentos de calor justo después del estallido, hasta los pocos grados sobre el cero absoluto que se encontrarían hoy en día si se llevara un termómetro al espacio profundo. Y, como explicaré en el próximo capítulo, debido a una interdependencia crítica entre el

calor y la simetría, lo que vemos hoy probablemente no sea más que un fresco remanente de la simetría mucho más rica que moldeó el universo primitivo y determinó algunas de las características más familiares y esenciales del cosmos.

9 - Vaporizar el vacío

CALENTAR LA NADA Y LA UNIFICACIÓN

Durante el 95% de la historia del universo, un correligionario cósmico preocupado por la forma general del universo habría informado más o menos la misma historia: *El universo continúa expandiéndose. La materia continúa expandiéndose debido a la expansión. La densidad del universo continúa disminuyendo. La temperatura sigue bajando. En la mayor de las escalas, el universo mantiene una apariencia simétrica y homogénea.* Pero no siempre habría sido tan fácil cubrir el cosmos. Las etapas más tempranas habrían requerido un informe furiosamente agitado, porque en esos momentos iniciales el universo sufrió un rápido cambio. Y ahora sabemos que lo que sucedió en ese entonces ha jugado un papel dominante en lo que experimentamos hoy.

En este capítulo nos centraremos en los momentos críticos en la primera fracción de segundo después del big bang, cuando se cree que la cantidad de simetría que encarna el universo ha cambiado abruptamente, y cada cambio lanza una época profundamente diferente en la historia cósmica. Mientras que el corresponsal puede ahora enviar por fax las mismas líneas cada pocos miles de millones de años, en esos primeros momentos de cambios bruscos de simetría el trabajo habría sido considerablemente más difícil, porque la estructura básica de la materia y las fuerzas responsables de su comportamiento habrían sido completamente desconocidas. La razón está ligada a una interacción entre el *calor* y *la simetría,* y requiere un completo replanteamiento de lo que entendemos por las nociones de espacio vacío y de nada. Como veremos, tal replanteamiento no sólo enriquece sustancialmente nuestra comprensión de los primeros momentos del universo, sino que también nos lleva un paso más cerca de la realización de un sueño que se remonta a Newton, Maxwell y, en particular, a Einstein, el sueño de la *unificación.* De igual importancia, estos desarrollos preparan el escenario para el marco cosmológico más moderno, la cosmología *inflacionaria,* un enfoque que anuncia respuestas a algunas de las preguntas más apremiantes y los rompecabezas más espinosos en los que el modelo estándar del big bang es mudo.

El calor y la simetría

Cuando las cosas se calientan o se enfrían mucho, a veces cambian. Y a veces el cambio es tan pronunciado que ni siquiera puedes reconocer las cosas con las que empezaste. Debido a las tórridas condiciones justo después del estallido, y el subsiguiente y rápido descenso de la temperatura a medida que el espacio se expandía y enfriaba, entender los efectos del cambio de temperatura es crucial para lidiar con la historia temprana del universo. Pero comencemos con algo más simple. Empecemos con el hielo.

Si calientas un trozo de hielo muy frío, al principio no pasa mucho. Aunque su temperatura aumenta, su apariencia permanece prácticamente inalterada. Pero si elevas su temperatura hasta los 0 grados Celsius y mantienes el calor, de repente ocurre algo dramático. El hielo sólido comienza a derretirse y se convierte en agua líquida. No dejes que la familiaridad de esta transformación opacar el espectáculo. Sin experiencias previas que involucren al hielo y al agua, sería un desafío darse cuenta de la íntima conexión entre ellos. Uno es un sólido duro como una roca mientras que el otro es un líquido viscoso. Una simple observación no revela evidencia directa de que su composición molecular, H2O, sea idéntica. Si nunca antes hubieras visto hielo o agua y se te presentara una cubeta de cada uno, al principio probablemente pensarías que no están relacionados. Y sin embargo, cuando cualquiera de los dos cruza a través de 0 grados centígrados, serías testigo de una maravillosa alquimia mientras cada uno se transmuta en el otro.

Si se continúa calentando el agua líquida, de nuevo se encuentra que por un tiempo no pasa mucho más allá de un aumento constante de la temperatura. Pero entonces, cuando se alcanzan los 100 grados centígrados, se produce otro cambio brusco: el agua líquida comienza a hervir y se transmuta en vapor, un gas caliente que, de nuevo, no está obviamente conectado al agua líquida o al hielo sólido. Sin embargo, por supuesto, los tres comparten la misma composición molecular. Los cambios de sólido a líquido y de líquido a gas se conocen como *transiciones de fase.* La mayoría de las sustancias atraviesan una secuencia similar de cambios si sus temperaturas varían a través de un rango suficientemente amplio. [1]

La simetría juega un papel central en las transiciones de fase. En casi todos los casos, si comparamos una medida adecuada de la simetría de algo antes y después de que pase por una transición de fase, encontramos un cambio significativo. A escala molecular, por ejemplo, el hielo tiene una forma cristalina con moléculas de H_2O dispuestas en un entramado ordenado y hexagonal. Al igual que las simetrías del cuadro de la figura 8.1, el patrón general de las moléculas de hielo se mantiene sin cambios sólo por ciertas manipulaciones especiales, como las rotaciones en unidades de 60 grados sobre determinados ejes de la disposición hexagonal. Por el contrario, cuando calentamos el hielo, la disposición cristalina se derrite en un grupo desordenado y uniforme de moléculas -agua líquida- que permanece inalterado bajo las rotaciones por cualquier ángulo, sobre cualquier eje. Así que, al calentar el hielo y hacer que pase por una

transición de fase sólido a líquido, lo hemos hecho más simétrico. (Recuerde, aunque usted podría pensar intuitivamente que algo más ordenado, como el hielo, es más simétrico, es todo lo contrario; algo es más simétrico si puede ser sometido a más transformaciones, como rotaciones, mientras su apariencia permanece sin cambios).

Del mismo modo, si calentamos agua líquida y ésta se convierte en vapor gaseoso, la transición de fase también da lugar a un aumento de la simetría. En un grupo de agua, las moléculas individuales de H_2O están, en promedio, empaquetadas con el lado de hidrógeno de una molécula junto al lado de oxígeno de su vecina. Si rotaras una u otra molécula en un grupo, se alteraría notablemente el patrón molecular. Pero cuando el agua hierve y se convierte en vapor, las moléculas revolotean aquí y allá libremente; ya no hay ningún patrón en la orientación de las moléculas de H_2O y por lo tanto, si se rota una molécula o grupo de moléculas, el gas se vería igual. Por lo tanto, así como la transición del hielo al agua resulta en un aumento de la simetría, la transición del agua al vapor también lo hace. La mayoría de las sustancias (pero no todas [2]) se comportan de manera similar, experimentando un aumento de la simetría cuando se someten a las transiciones de fase sólido a líquido y líquido a gas.

La historia es muy parecida cuando se enfría agua o casi cualquier otra sustancia; sólo que ocurre a la inversa. Por ejemplo, cuando se enfría vapor gaseoso, al principio no sucede mucho, pero a medida que su temperatura desciende a 100 grados centígrados, comienza repentinamente a condensarse en agua líquida; cuando se enfría agua líquida, no sucede mucho hasta que se llega a 0 grados centígrados, en cuyo momento comienza repentinamente a congelarse en hielo sólido. Y, siguiendo el mismo razonamiento con respecto a las simetrías, pero al revés, concluimos que ambas transiciones de fase van acompañadas de una *disminución de* la simetría. [23]

Hasta aquí llegó el hielo, el agua, el vapor y sus simetrías. ¿Qué tiene que ver todo esto con la cosmología? Bueno, en la década de 1970, los físicos se dieron cuenta de que no sólo los objetos *del* universo pueden sufrir transiciones de fase, *sino que el cosmos en su conjunto también puede hacerlo.* Durante los últimos 14.000 millones de años, el universo se ha expandido y descomprimido constantemente. Y así como un neumático de bicicleta en descompresión se enfría, la temperatura del universo en expansión ha bajado constantemente. Durante gran parte de este descenso de la temperatura, no ha pasado mucho. Pero hay razones para creer que cuando el universo pasó a través de temperaturas críticas particulares - los análogos de 100 grados Celsius para el vapor y 0 grados Celsius para el agua - sufrió un cambio radical y experimentó una drástica reducción de la simetría. Muchos físicos creen que ahora vivimos en una fase "condensada" o "congelada" del universo, una fase muy diferente a la de épocas anteriores. Las transiciones de fase cosmológica no implicaron literalmente que un gas se condensara en un líquido, o que un líquido se congelara en un

sólido, aunque hay muchas similitudes cualitativas con estos ejemplos más familiares. Más bien, la "sustancia" que se condensó o congeló cuando el universo se enfrió a través de determinadas temperaturas es un campo, más precisamente, un *campo de Higgs.* Veamos lo que esto significa.

Fuerza, Materia y Campos de Higgs

Los campos proporcionan el marco para gran parte de la física moderna. El campo electromagnético, discutido en el capítulo 3, es quizás el más simple y más ampliamente apreciado de los campos de la naturaleza. Viviendo entre las emisiones de radio y televisión, las comunicaciones por teléfono celular, el calor y la luz del sol, todos estamos constantemente inundados en un mar de campos electromagnéticos. Los fotones son los constituyentes elementales de los campos electromagnéticos y pueden ser considerados como los transmisores microscópicos de la fuerza electromagnética. Cuando ves algo, puedes pensar en ello en términos de un campo electromagnético ondulante que entra en tu ojo y estimula tu retina, o en términos de partículas de fotones que entran en tu ojo y hacen lo mismo. Por esta razón, el fotón es a veces descrito como la partícula *mensajera* de la fuerza electromagnética.

El campo gravitatorio también es familiar ya que nos ancla constante y consistentemente, y a todo lo que nos rodea, a la superficie de la Tierra. Al igual que los campos electromagnéticos, todos estamos inmersos en un mar de campos gravitatorios; el de la Tierra es dominante, pero también sentimos los campos gravitatorios del sol, la luna y los otros planetas. Así como los fotones son partículas que constituyen un campo electromagnético, los físicos creen que *los gravitones* son partículas que constituyen un campo gravitacional. Las partículas de gravitones aún no han sido descubiertas experimentalmente, pero eso no es sorprendente. La gravedad es, con mucho, la más débil de todas las fuerzas (por ejemplo, un imán ordinario de un refrigerador puede recoger un sujetapapeles, superando así la atracción de *toda* la gravedad de la Tierra), por lo que es comprensible que los experimentadores aún no hayan detectado los componentes más pequeños de la fuerza más débil. Sin embargo, incluso sin la confirmación experimental, la mayoría de los físicos creen que, al igual que los fotones transmiten la fuerza electromagnética (son las partículas mensajeras de la fuerza electromagnética), los gravitones transmiten la fuerza gravitatoria (son las partículas mensajeras de la fuerza gravitatoria). Cuando se deja caer un vaso, se puede pensar en el evento en términos del campo gravitatorio de la Tierra que tira del vaso, o, utilizando la descripción geométrica más refinada de Einstein, se puede pensar en términos del deslizamiento del vaso a lo largo de una hendidura en el tejido del espacio tiempo causado por la presencia de la Tierra, o -si los gravitones existen de hecho- también se puede pensar en términos de las partículas de gravitones que se disparan de un lado a otro entre la Tierra y el vaso, comunicando un "mensaje" gravitatorio que "le dice" al vaso que caiga hacia la Tierra.

Más allá de estos campos de fuerza bien conocidos, hay otras dos fuerzas de la naturaleza, la *fuerza nuclear fuerte* y la fuerza nuclear débil*,* y también ejercen su

influencia a través de los campos. Las fuerzas nucleares son menos conocidas que el electromagnetismo y la gravedad porque operan sólo en las escalas atómicas y subatómicas. Aún así, su impacto en la vida cotidiana, a través de la fusión nuclear que hace que el sol brille, la fisión nuclear en funcionamiento en los reactores atómicos, y la desintegración radiactiva de elementos como el uranio y el plutonio, no es menos significativo. Los campos de fuerza nuclear fuertes y débiles se denominan campos *Yang*- Mills en honor a C. N. Yang y Robert Mills, quienes elaboraron sus fundamentos teóricos en la década de 1950. Y así como los campos electromagnéticos están compuestos de fotones, y los campos gravitacionales se cree que están compuestos de gravitones, los campos fuertes y débiles también tienen componentes de partículas. Las partículas de la fuerza fuerte se llaman *gluones* y las de la fuerza débil se llaman partículas W y Z. La existencia de estas partículas de fuerza fue confirmada por experimentos con aceleradores realizados en Alemania y Suiza a finales del decenio de 1970 y principios del de 1980.

El marco de campo también se aplica a la materia. En términos generales, las ondas de probabilidad de la mecánica cuántica pueden considerarse en sí mismas como campos que llenan el espacio y que proporcionan la probabilidad de que alguna u otra partícula de materia esté en algún lugar. Un electrón, por ejemplo, puede pensarse como una partícula -que puede dejar un punto en una pantalla de fósforo, como en la figura 4.4- pero también puede (y debe) pensarse en términos de un campo ondulatorio, que puede contribuir a un patrón de interferencia en una pantalla de fósforo, como en la figura 4.3b.[3] De hecho, aunque no entraré en más detalles aquí, [4] la onda de probabilidad de un electrón está estrechamente asociada con algo llamado campo de electrones*,* un campo que en muchos aspectos es similar a un campo electromagnético pero en el que el electrón desempeña un papel análogo al del fotón, siendo el constituyente más pequeño del campo de electrones. El mismo tipo de descripción de campo también es válido para todas las demás especies de partículas de materia.

Habiendo discutido tanto los campos de materia como los campos de fuerza, se podría pensar que hemos cubierto todo. Pero hay un acuerdo general de que la historia contada hasta ahora no es del todo completa. Muchos físicos creen firmemente que todavía hay un tercer tipo de campo, uno que nunca ha sido detectado experimentalmente pero que en las últimas dos décadas ha jugado un papel fundamental tanto en el pensamiento cosmológico moderno como en la física de partículas elementales. Se llama campo de Higgs, en honor al físico escocés Peter Higgs. [5] Y si las ideas de la siguiente sección son correctas, el universo entero está permeado por un océano de campo de Higgs - una fría reliquia del big bang- que es responsable de muchas de las propiedades de las partículas que nos componen a ti y a mí y a todo lo demás que hemos encontrado.

Campos en un Universo en enfriamiento

Los campos responden a la temperatura de la misma manera que la materia ordinaria. Cuanto más alta es la temperatura, más ferozmente el valor de un campo -como la superficie de una olla de agua en rápido hervido- se eleva y baja. A la escalofriante temperatura característica del espacio profundo hoy en día (2,7 grados sobre el cero absoluto, o 2,7 Kelvin, como suele denominarse), o incluso a las temperaturas más cálidas aquí en la Tierra, las ondulaciones de los campos son minúsculas. Pero la temperatura justo después del big bang era tan enorme (se cree que la temperatura era de $10^{a\ 43}$ segundos después del bang, unos $10^{a\ 32}$ Kelvin) que todos los campos se movían violentamente de un lado a otro.

A medida que el universo se expandía y enfriaba, la enorme densidad inicial de materia y radiación disminuyó constantemente, la vasta expansión del universo se volvió cada vez más vacía, y las ondulaciones del campo se volvieron cada vez más tenues. Para la mayoría de los campos esto significó que sus valores, en promedio, se acercaron a cero. En algún momento, el valor de un campo particular podría fluctuar ligeramente por encima de cero (un pico) y un momento más tarde podría caer ligeramente por debajo de cero (una depresión), pero en promedio el valor de la mayoría de los campos se cerró en cero, el valor que intuitivamente asociamos con la ausencia o el vacío.

Aquí es donde entra el campo de Higgs. Es una variedad de campo, los investigadores se han dado cuenta, que tenía propiedades similares a las de otros campos a las temperaturas abrasadoras justo después del Big Bang: fluctuaba salvajemente arriba y abajo. Pero los investigadores creen que (al igual que el vapor se condensa en agua líquida cuando su temperatura baja lo suficiente) cuando la temperatura del universo bajó lo suficiente, el campo Higgs se condensó en un valor particular distinto *de cero* en todo el espacio. Los físicos se refieren a esto como la formación de un valor de expectativa *de vacío del campo de Higgs no* cero, pero para facilitar la jerga técnica, me referiré a esto como la formación de un *océano de Higgs.*

Es algo así como lo que pasaría si se dejara caer una rana en un bol de metal caliente, como en la figura 9.1a, con una pila de gusanos en el centro. Al principio, la rana saltaría de esta manera y de aquella, arriba, abajo, izquierda, derecha, en un intento desesperado de evitar quemarse las patas, y en promedio se quedaría tan lejos de los gusanos que ni siquiera sabría que están ahí. Pero a medida que el tazón se enfriaba, la rana se calmaba, casi no saltaba y, en cambio, se deslizaba suavemente hacia el lugar más tranquilo en el fondo del tazón. Allí, habiéndose cerrado en el centro del tazón, finalmente se encontraría con su cena, como en la figura 9.1b.

Pero si el tazón tuviera una forma diferente, como en la figura 9.1c, las cosas saldrían de manera diferente. Imaginen de nuevo que el tazón comienza muy

caliente y que la pila de gusanos todavía está en el centro del tazón, ahora en lo alto de la protuberancia central. Si dejas caer la rana, volverá a saltar salvajemente de esta forma y de aquella otra, sin tener en cuenta el premio encaramado en la meseta central. Luego, a medida que el tazón se enfriaba, la rana se asentaba de nuevo, reducía su salto y se deslizaba por los lados lisos del tazón. Pero debido a la nueva forma, la rana nunca llegaría al centro del tazón. En su lugar, se deslizaría por el valle del tazón y se mantendría a distancia de la pila de gusanos, como en la figura 9.1d.



Figura 9.1 **(** a **)** Una rana que cae en un bol de metal caliente salta incesantemente. Cuando el bol se enfría, la rana se calma, salta mucho menos y se desliza hasta el centro del bol.

Si imaginamos que la distancia entre la rana y la pila de gusanos representa el valor de un campo, cuanto más lejos esté la rana de los gusanos, mayor será el valor del campo, y la altura de la rana representa la energía contenida en ese valor del campo, cuanto más arriba en el cuenco esté la rana, más energía contiene el campo, entonces estos ejemplos transmiten bien el comportamiento de los campos a medida que el universo se enfría. Cuando el universo está caliente, los campos saltan salvajemente de un valor a otro, de la misma manera que la rana salta de un lugar a otro en el tazón. A medida que el universo se enfría, los campos "se calman", saltan menos a menudo y menos frenéticamente, y sus valores se deslizan hacia abajo a una energía más baja.

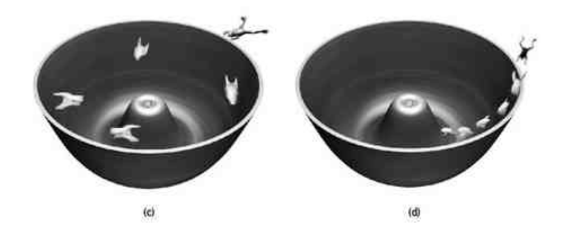


Figura 9.1 **(** c **)** Como en a), pero con un bol caliente de forma diferente. **Como en** b), pero ahora cuando el cuenco se enfría, la rana se desliza hacia el valle, que está a cierta distancia del centro del cuenco (donde se encuentran los gusanos).

Pero esta es la cuestión. Como con el ejemplo de la rana, hay una posibilidad de dos resultados cualitativamente diferentes. Si la forma del tazón de energía del

campo, su llamada*energía potencial*, es similar a la de la figura 9.1a, el valor del campo en el espacio se deslizará hasta cero, el centro del tazón, igual que la rana se desliza hasta la pila de gusanos. Sin embargo, si la energía potencial del campo es como la de la figura 9.1c, el valor del campo no llegará hasta cero, hasta el centro del cuenco de energía. En cambio, al igual que la rana se deslizará hacia el valle, que es una *cero de* la pila de gusanos, el valor del campo también se deslizará hacia el valle, una distancia distinta de cero del centro del tazón, y eso significa que el campo tendrá un valor distinto de cero. [6] Este último comportamiento es característico de los campos de Higgs. A medida que el universo se enfría, el valor de un campo de Higgs queda atrapado en el valle y nunca llega a cero. Y ya que lo que estamos describiendo sucedería uniformemente en todo el espacio, el universo estaría permeado por un campo de Higgs uniforme y distinto de cero, un océano de Higgs.

La razón por la que esto sucede arroja luz sobre la peculiaridad fundamental de los campos de Higgs. A medida que una región del espacio se vuelve cada vez más fría y vacía, como la materia y la radiación se vuelven cada vez más escasas, la energía en la región se vuelve cada vez más baja. Llevando esto al límite, sabes que has alcanzado el mayor vacío que una región del espacio puede ser cuando has bajado su energía lo más posible. Para los campos ordinarios que bañan una región del espacio, su contribución energética es menor cuando su valor se ha deslizado hasta el centro del cuenco, como en la figura 9.1b; tienen energía cero cuando su valor es cero. Esto tiene un sentido bueno e intuitivo, ya que asociamos el vaciado de una región del espacio con la puesta a cero de todo, incluyendo los valores de los campos.

Pero para un campo de Higgs, las cosas funcionan de manera diferente. Al igual que una rana puede llegar a la meseta central en la figura 9.1c y tener una distancia *cero de la pila de gusanos* sólo si tiene suficiente energía para saltar desde el valle circundante, un campo de Higgs puede llegar al centro del tazón, y tener *valor cero,* sólo si también encarna suficiente energía para superar el golpe central del tazón. Si, por el contrario, la rana tiene poca o ninguna energía, se deslizará al valle en la figura 9.1d-una distancia *no nula de* la pila de gusanos. Del mismo modo, un campo de Higgs con poca o ninguna energía también se deslizará hacia el valle del tazón -una distancia distinta de cero del centro del tazón- y por lo tanto tendrá un valor distinto de cero.

Para forzar un campo de Higgs a tener un valor de cero -el valor que parecería ser lo más cercano a eliminar completamente el campo de la región, el valor que parecería ser lo más cercano a un estado de nada- tendría que *elevar* su energía y, energéticamente hablando, la región del espacio no estaría tan vacía como podría. Aunque suene contradictorio, eliminar el campo de Higgs, reduciendo su valor a cero, es decir, equivale a añadir energía a la región. Como una analogía aproximada, piense en uno de esos elegantes auriculares de reducción de ruido que producen ondas sonoras para cancelar las que provienen del entorno y que

de otro modo afectarían a sus tímpanos. Si los auriculares funcionan perfectamente, se oye el silencio cuando producen sus sonidos, pero se oye el ruido ambiental si se apagan. Los investigadores han llegado a creer que así como se oye *menos* cuando los auriculares están llenos de los sonidos que están programados para producir, el espacio frío y vacío alberga la menor cantidad de energía posible -está tan vacío como puede estar- cuando está lleno de un océano de campo de Higgs. Los investigadores se refieren al espacio más vacío como el vacío, y así aprendemos que el vacío puede ser realmente permeado por un campo de Higgs uniforme.

El proceso de que un campo de Higgs asuma un valor distinto de cero en todo el espacio -formando un océano de Higgs- se denomina *simetría espontánea que rompe* [24] y es una de las ideas más importantes que han surgido en las últimas décadas de la física teórica del siglo XX. Veamos por qué.

El Océano de Higgs y el origen de la masa

Si un campo de Higgs tiene un valor distinto de cero, si todos estamos inmersos en un océano de campo de Higgs, entonces ¿no deberíamos sentirlo o verlo o ser conscientes de ello de alguna manera? Absolutamente. Y la teoría moderna afirma que lo hacemos. Tome su brazo y muévalo de un lado a otro. Puedes sentir tus músculos trabajando impulsando la masa de tu brazo a la izquierda y a la derecha y de nuevo. Si tomas una bola de boliche, tus músculos tendrán que trabajar más duro, ya que cuanto mayor sea la masa a mover, mayor será la fuerza que deberán ejercer. En este sentido, la masa de un objeto representa la resistencia que tiene a ser movido; más precisamente, la masa representa la resistencia que un objeto tiene a los cambios en su movimiento -a las aceleraciones- como ir primero a la izquierda y luego a la derecha y luego a la izquierda otra vez. Pero ¿de dónde viene esta resistencia a ser acelerado? O, en términos de física, ¿qué le da a un objeto su inercia?

En los capítulos 2 y 3 encontramos varias propuestas que Newton, Mach y Einstein avanzaron como respuestas *parciales* a esta pregunta. Estos científicos buscaron especificar un estándar de descanso con respecto al cual las aceleraciones, como las que surgen en el experimento del cubo giratorio, pudieran ser definidas. Para Newton, el estándar era el espacio absoluto; para Mach, eran las estrellas distantes; y para Einstein, era inicialmente el espaciotiempo absoluto (en relatividad especial) y luego el campo gravitatorio (en relatividad general). Pero una vez delineado un estándar de reposo y, en particular, especificado un punto de referencia para definir las aceleraciones, ninguno de estos científicos dio el siguiente paso para explicar *por qué* los objetos resisten las aceleraciones. Es decir, ninguno de ellos especificó un mecanismo por el cual un objeto adquiere su

masa -su inercia- el atributo que combate las aceleraciones. Con el campo de Higgs, los físicos han sugerido ahora una respuesta.

Los átomos que componen tu brazo, y la bola de boliche que puedes haber recogido, están todos hechos de protones, neutrones y electrones. Los protones y neutrones, los experimentadores revelaron a finales de los 60, están cada uno compuesto de tres partículas más pequeñas conocidas como quarks. Así que, cuando mueves tu brazo hacia atrás y adelante, estás moviendo todos los quarks y electrones constituyentes hacia atrás y adelante, lo que nos lleva al punto. El océano de Higgs, en el que la teoría moderna afirma que todos estamos inmersos, *interactúa* con los quarks y los electrones: resiste sus aceleraciones de la misma manera que una cuba de melaza resiste el movimiento de una pelota de ping-pong que ha sido sumergida. Y esta resistencia, este arrastre de componentes de partículas, contribuye a lo que usted percibe como la masa de su brazo y la bola de boliche que está balanceando, o como la masa de un objeto que está lanzando, o como la masa de todo su cuerpo al acelerar hacia la línea de meta en una carrera de 100 metros. Y así *sentimos*el océano de Higgs. Las fuerzas que todos ejercemos miles de veces al día con el fin de cambiar la velocidad de un objeto u otro, para impartir una aceleración, son fuerzas que luchan contra el arrastre del océano de Higgs. [8]

La metáfora de la melaza captura bien algunos aspectos del océano de Higgs. Para acelerar una pelota de ping-pong sumergida en melaza, tendrías que empujarla *mucho* más fuerte que cuando juegas con ella en tu mesa del sótano, resistirá tus intentos de cambiar su velocidad más fuertemente que cuando no está en melaza, y así se comporta como si el hecho de estar sumergida en melaza hubiera aumentado su masa. De manera similar, como resultado de sus interacciones con el omnipresente océano de Higgs, las partículas elementales se resisten a los intentos de cambiar sus velocidades, y adquieren masa. Sin embargo, la metáfora de la melaza tiene tres características engañosas de las que debe ser consciente.

Primero, siempre puedes meter la mano en la melaza, sacar la pelota de ping-pong y ver cómo disminuye su resistencia a la aceleración. Esto no es cierto para las partículas. Creemos que, hoy en día, el océano de Higgs llena todo el espacio, por lo que no hay manera de eliminar las partículas de su influencia; todas las partículas tienen las masas que tienen independientemente de dónde estén. En segundo lugar, la melaza resiste todo el movimiento, mientras que el campo de Higgs sólo resiste el movimiento acelerado. A diferencia de una pelota de ping-pong que se mueve a través de la melaza, una partícula que se mueve a través del espacio exterior a una velocidad constante no sería frenada por la "fricción" con el océano de Higgs. En su lugar, su movimiento continuaría sin cambios. Sólo cuando intentamos acelerar o ralentizar la partícula, el océano del campo de Higgs se hace presente por la fuerza que tenemos que ejercer. En tercer lugar, cuando se trata de materia familiar compuesta de conglomerados de partículas

fundamentales, hay otra importante fuente de masa. Los quarks que constituyen los protones y los neutrones se mantienen unidos por la fuerza nuclear fuerte: las partículas de gluón (las partículas mensajeras de la fuerza fuerte) fluyen entre los quarks, "pegándolos".

Los experimentos han demostrado que estos gluones son altamente energéticos, y como la $E=mc^{2}$ de Einstein nos dice que la energía (E) puede manifestarse como masa (m), aprendemos que los gluones dentro de los protones y neutrones contribuyen con una fracción significativa de la masa total de estas partículas. Por lo tanto, una imagen más precisa es pensar en la fuerza de arrastre parecida a la melaza del océano de Higgs como la que da masa a las partículas *fundamentales como los electrones* y los quarks, pero cuando estas partículas se combinan en partículas compuestas como protones, neutrones y átomos, también entran en juego otras fuentes (bien entendidas) de masa.

Los físicos asumen que el grado en que el océano de Higgs resiste la aceleración de una partícula varía con la especie particular de la partícula. Esto es esencial, porque las especies conocidas de partículas fundamentales tienen todas masas diferentes. Por ejemplo, mientras que los protones y los neutrones están compuestos por dos especies de quarks (llamados *up-quarks* y *down-quarks*: un protón está formado por dos ups y un down; un neutrón, por dos downs y un up), a lo largo de los años los experimentadores que utilizan rompedores de átomos han descubierto otras cuatro especies de partículas de quarks, cuyas masas abarcan un amplio rango, desde 0,0047 hasta 189 veces la masa de un protón. Los físicos creen que la explicación de la variedad de masas es que los diferentes tipos de partículas interactúan más o menos fuertemente con el océano de Higgs. Si una partícula se mueve suavemente a través del océano de Higgs con poca o ninguna interacción, habrá poca o ninguna resistencia y la partícula tendrá poca o ninguna masa. El fotón es un buen ejemplo. Los fotones pasan completamente sin obstáculos a través del océano de Higgs y por lo tanto no tienen ninguna masa. Si, por el contrario, una partícula interactúa significativamente con el océano de Higgs, tendrá una mayor masa. El quark más pesado (se llama *top-quark*), con una masa que es alrededor de 350.000 veces la de un electrón, interactúa 350.000 veces más fuertemente con el océano de Higgs que un electrón; tiene mayor dificultad para acelerar a través del océano de Higgs, y por eso tiene una mayor masa. Si comparamos la masa de una partícula con la fama de una persona, entonces el océano de Higgs es como los paparazzi: los desconocidos pasan a través de los enjambres de fotógrafos con facilidad, pero los políticos famosos y las estrellas de cine tienen que esforzarse mucho más para llegar a su destino. [9]

Esto da un buen marco para pensar en por qué una partícula tiene una masa diferente a la de otra, pero, hasta hoy, no hay una explicación fundamental para la manera precisa en que cada una de las especies de partículas conocidas interactúan con el océano de Higgs. Como resultado, no hay una explicación fundamental de por qué las partículas conocidas tienen las masas particulares que han sido reveladas experimentalmente. Sin embargo, la mayoría de los físicos creen que si no fuera por el océano de Higgs, *todas las partículas fundamentales serían como el fotón y no tendrían masa alguna.* De hecho, como veremos ahora, esto podría haber sido como las cosas en los primeros momentos del universo.

Unificación en un universo en enfriamiento

Mientras que el vapor gaseoso se condensa en agua líquida a 100 grados centígrados, y el agua líquida se congela en hielo sólido a 0 grados centígrados, los estudios teóricos han demostrado que el campo de Higgs se condensa en un valor distinto de cero a un millón de miles de millones (10^{15}) de grados. Eso es casi 100 millones de veces la temperatura en el núcleo del sol, y es la temperatura a la que se cree que el universo ha bajado en una centésima de una billonésima (10^{-11}) de segundo después del big bang (ATB). Antes de 10^{-11} segundos del ATB, el campo de Higgs fluctuaba hacia arriba y hacia abajo pero tenía un valor promedio de cero; como con el agua por encima de los 100 grados centígrados, a tales temperaturas un océano de Higgs no podía formarse porque estaba demasiado caliente. El océano se habría evaporado inmediatamente. Y sin un océano de Higgs no había resistencia a las partículas en movimiento acelerado (los paparazzi desaparecieron), lo que implica que todas las partículas conocidas (electrones, up-quarks, down-quarks, y el resto) tenían la misma masa: cero.

Esta observación explica en parte por qué la formación del océano de Higgs se describe como una transición de fase cosmológica. En las transiciones de fase de vapor a agua y de agua a hielo, ocurren dos cosas esenciales. Hay un cambio cualitativo significativo en la apariencia, y la transición de fase va acompañada de una reducción de la simetría. Vemos los mismos dos rasgos en la formación del océano de Higgs. En primer lugar, hubo un cambio cualitativo significativo: las especies de partículas que no tenían masa adquirieron repentinamente masas no nulas, las masas que ahora se encuentran en esas especies de partículas. En segundo lugar, este cambio fue acompañado por una disminución de la simetría: antes de la formación del océano de Higgs, todas las partículas tenían la misma masa-cero, un estado de cosas altamente simétrico. Si se intercambiara la masa de una especie de partícula con otra, nadie lo sabría, porque las masas eran todas iguales. Pero después de que el campo de Higgs se condensó, las masas de las partículas se transmutaron en valores no cero y no iguales, y así se perdió la simetría entre las masas.

De hecho, la reducción de la simetría derivada de la formación del océano de Higgs es aún más extensa. Por encima de los 10^{15} grados, cuando el campo de Higgs todavía no se había condensado, no sólo todas las especies de partículas de materia fundamental no tenían masa, sino que también, sin el arrastre resistivo de un océano de Higgs, todas las especies de partículas de fuerza no tenían masa. (Hoy en día, las partículas mensajeras W y Z de la fuerza nuclear débil tienen masas que son alrededor de 86 y 97 veces la masa del protón). Y, como fue descubierto originalmente en los años 60 por Sheldon Glashow, Steven Weinberg y Abdus Salam, la falta de masa de todas las partículas de fuerza fue acompañada por otra simetría fantásticamente hermosa.

A finales del siglo XIX Maxwell se dio cuenta de que la electricidad y el magnetismo, aunque una vez se pensó que eran dos fuerzas completamente separadas, son en realidad facetas diferentes de la misma fuerza: la fuerza electromagnética (véase el capítulo 3). Su trabajo demostró que la electricidad y el magnetismo se completan mutuamente; son el yin y el yang de un todo más simétrico y unificado. Glashow, Salam y Weinberg descubrieron el siguiente capítulo de esta historia de unificación. Se dieron cuenta de que antes de que se formara el océano de Higgs, no sólo todas las partículas de fuerza tenían masas idénticas, cero, sino que los fotones y las partículas W y Z eran idénticas en esencia en todos los demás sentidos también. [10] Así como un copo de nieve no se ve afectado por las rotaciones particulares que intercambian las ubicaciones de sus puntas, los procesos físicos en ausencia del océano de Higgs no se habrían visto afectados por los intercambios particulares de partículas de fuerza electromagnética y nuclear débil, por los intercambios particulares de fotones y partículas W y Z. Y así como la insensibilidad de un copo de nieve a ser rotado refleja una simetría (simetría rotacional), la insensibilidad al intercambio de estas partículas de fuerza también refleja una simetría, que por razones técnicas se llama simetría de *.* Tiene una profunda implicación. Dado que estas partículas transmiten sus respectivas fuerzas -son las partículas mensajeras de su fuerza- la simetría entre ellas significa que había simetría entre las fuerzas. Por lo tanto, a temperaturas lo suficientemente altas, temperaturas que vaporizarían el actual vacío lleno de Higgs, no hay distinción entre la fuerza nuclear débil y la fuerza electromagnética. A temperaturas suficientemente altas, es decir, el océano de Higgs se evapora; como lo hace, la distinción entre las fuerzas débiles y electromagnéticas también se evapora.

Glashow, Weinberg y Salam habían ampliado el centenario descubrimiento de Maxwell mostrando que las fuerzas electromagnéticas y nucleares débiles son en realidad parte de una misma fuerza. Habían *unificado* la descripción de estas dos fuerzas en lo que ahora se llama la fuerza electrodébil.

La simetría entre las fuerzas electromagnéticas y débiles no es aparente hoy en día porque a medida que el universo se enfrió, el océano de Higgs se formó, y -esto es vital- los fotones y las partículas W y Z interactúan con el campo condensado de Higgs de manera diferente. Los fotones pasan a través del océano de Higgs tan fácilmente como los de la película B se deslizan a través de los paparazzi, y por lo tanto permanecen sin masa. Las partículas W y Z, sin embargo, como Bill Clinton y Madonna, tienen que abrirse camino a través de ellas, adquiriendo masas que son 86 y 97 veces la de un protón, respectivamente. (Nota: esta metáfora no es a escala.) Por eso las fuerzas electromagnéticas y nucleares débiles parecen tan diferentes en el mundo que nos rodea. La simetría subyacente entre ellas está "rota", u oscurecida, por el océano de Higgs.

Este es un resultado realmente impresionante. Dos fuerzas que se ven muy diferentes a las temperaturas actuales - la fuerza electromagnética responsable de

la luz, la electricidad y la atracción magnética, y la débil fuerza nuclear responsable de la desintegración radiactiva - son fundamentalmente parte de la misma fuerza, y parecen ser diferentes sólo porque el campo de Higgs no nulo oscurece la simetría entre ellas. Por lo tanto, lo que normalmente pensamos como espacio vacío, el vacío, la nada, juega un papel central en hacer que las cosas en el mundo aparezcan como lo hacen. Sólo mediante la vaporización del vacío, elevando la temperatura lo suficientemente alto como para que el campo de Higgs se evaporara, es decir, adquiriera un valor promedio de cero en todo el espacio, se haría evidente la simetría completa que subyace a las leyes de la naturaleza.

Cuando Glashow, Weinberg y Salam desarrollaron estas ideas, las partículas W y Z aún no habían sido descubiertas experimentalmente. Fue la fuerte fe que estos físicos tenían en el poder de la teoría y la belleza de la simetría lo que les dio la confianza para seguir adelante. Su audacia demostró estar bien fundada. A su debido tiempo, las partículas W y Z fueron descubiertas y la teoría electrodébil fue confirmada experimentalmente. Glashow, Weinberg y Salam habían mirado más allá de las apariencias superficiales, habían mirado a través de la niebla oscura de la nada, para revelar una profunda y sutil simetría que entrelazaba dos de las cuatro fuerzas de la naturaleza. Fueron galardonados con el Premio Nobel de 1979 por la exitosa unificación de la débil fuerza nuclear y el electromagnetismo.

Gran Unificación

Cuando era un estudiante de primer año en la universidad, pasaba de vez en cuando por mi consejero, el físico Howard Georgi. Nunca tuve mucho que decir, pero apenas importaba. Siempre había algo que Georgi se emocionaba por compartir con los estudiantes interesados. En una ocasión en particular, Georgi estaba especialmente excitado y habló con fuego rápido durante más de una hora, llenando la pizarra varias veces con símbolos y ecuaciones. Durante todo el tiempo, asentí con entusiasmo. Pero francamente, apenas entendí una palabra. Años más tarde me di cuenta de que Georgi me había hablado de los planes para probar un descubrimiento que había hecho llamado la *gran unificación.*

La gran unificación aborda una cuestión que naturalmente sigue al éxito de la unificación electrodébil: Si dos fuerzas de la naturaleza formaran parte de un todo unificado en el universo primitivo, ¿podría darse el caso de que, a temperaturas aún más altas, en épocas aún más tempranas de la historia del universo, las distinciones entre tres o posiblemente las cuatro fuerzas pudieran evaporarse de manera similar, dando lugar a una simetría aún mayor? Esto plantea la intrigante posibilidad de que pueda haber en realidad una sola fuerza fundamental de la naturaleza que, a través de una serie de transiciones de fase cosmológica, se haya cristalizado en las cuatro fuerzas aparentemente diferentes de las que somos conscientes actualmente. En 1974, Georgi y Glashow propusieron la primera

teoría que se dirigía parcialmente hacia este objetivo de unidad total. Su *gran teoría unificada,* junto con las posteriores ideas de Georgi, Helen Quinn y Weinberg, sugería que tres de las cuatro fuerzas - la fuerte, la débil y la electromagnética - formaban parte de una fuerza unificada cuando la temperatura superaba los 10.000 millones de millones de grados (10^{28}) - unos mil millones de millones de veces la temperatura en el centro del sol - condiciones extremas que existían antes de $10^{a\ 35}$ segundos después del estallido. Por encima de esa temperatura, sugirieron estos físicos, los fotones, los gluones de la fuerza fuerte, así como las partículas W y Z, podían intercambiarse libremente entre sí -una simetría de calibre más robusta que la de la teoría electrodébil- sin ninguna consecuencia observable. Georgi y Glashow sugirieron así que a estas altas energías y temperaturas había una completa simetría entre las tres partículas de fuerza no gravitatoria, y por lo tanto una completa simetría entre las tres fuerzas no gravitatorias. [11]

La gran teoría unificada de Glashow y Georgi continuó diciendo que no vemos esta simetría en el mundo que nos rodea -la fuerte fuerza nuclear que mantiene a los protones y neutrones fuertemente pegados en los átomos parece estar completamente separada de las fuerzas débiles y electromagnéticas- porque a medida que la temperatura bajaba por debajo de los 10^{28} grados, otra especie de campo de Higgs entró en la historia. Este campo de Higgs se llama el *gran Higgs unificado.* (Siempre que puedan confundirse, el campo de Higgs involucrado en la unificación electrodébil se llama el *Higgs electrodébil.*) Similar a su primo electrodébil, el gran Higgs unificado fluctuó salvajemente por encima de los 10^{28} grados, pero los cálculos sugirieron que se condensó en un valor distinto de cero cuando el universo cayó por debajo de esta temperatura. Y, como con el Higgs electrodependiente, cuando se formó este gran océano de Higgs unificado, el universo pasó por una transición de fase con la consiguiente reducción de la simetría. En este caso, debido a que el gran océano de Higgs unificado tiene un efecto diferente en los gluones que en las otras partículas de fuerza, la fuerte fuerza se escindió de la fuerza electrodébil, dando lugar a dos fuerzas no gravitacionales distintas donde antes había una. Una fracción de segundo y una caída de miles de millones y miles de millones de grados más tarde, el electrodébil Higgs se condensó, causando que las fuerzas débiles y electromagnéticas se separaran también.

Aunque es una idea hermosa, la gran unificación (a diferencia de la unificación electrodébil) no ha sido confirmada experimentalmente. Por el contrario, la propuesta original de Georgi y Glashow predijo un rastro, una implicación residual de la simetría temprana del universo que debería ser evidente hoy en día, una que permitiría que los protones se transmutaran de vez en cuando en otras especies de partículas (como los antielectrones y las partículas conocidas como piones). Pero después de años de búsqueda minuciosa de tal decadencia de *protones* en elaborados experimentos subterráneos -el experimento que Georgi me había descrito con entusiasmo en su oficina hace años- no se encontró ninguno; esto

descartó la propuesta de Georgi y Glashow. Desde entonces, sin embargo, los físicos han desarrollado variaciones de ese modelo original que no se han descartado por tales experimentos; sin embargo, hasta ahora ninguna de estas teorías alternativas se ha confirmado.

El consenso entre los físicos es que la gran unificación es una de las grandes ideas, aún no realizadas, de la física de partículas. Dado que la unificación y las transiciones de fase cosmológicas han demostrado ser tan potentes para el electromagnetismo y la fuerza nuclear débil, muchos consideran que es sólo cuestión de tiempo antes de que otras fuerzas se reúnan también dentro de un marco unificado. Como veremos en el capítulo 12, recientemente se han dado grandes pasos en esta dirección utilizando un enfoque diferente *-teoría de las supercuerdas-* que ha llevado, por primera vez, a *todas* las fuerzas, incluida la gravedad, a una teoría unificada, si bien es cierto que, en el momento de redactar este documento, todavía está en vigoroso desarrollo. Pero lo que ya está claro, incluso considerando sólo la teoría electrodébil, es que el universo que vemos actualmente no es más que un remanente de la resplandeciente simetría del universo primitivo.

El regreso del Aether

El concepto de ruptura de la simetría, y su realización a través del campo electrodébil de Higgs, juega claramente un papel central en la física de partículas y la cosmología. Pero la discusión puede haberle dejado preguntándose sobre lo siguiente: Si un océano de Higgs es un algo invisible que llena lo que normalmente pensamos como espacio vacío, ¿no es sólo otra encarnación de la desacreditada noción del éter? La respuesta: sí y no. La explicación: sí, de hecho, de alguna manera un océano de Higgs huele al éter. Como el éter, un campo condensado de Higgs impregna el espacio, nos rodea a todos, se filtra a través de todo lo material, y, como una característica inamovible del espacio vacío (a menos que recalentemos el universo por encima de los $^{10-15}$grados, lo cual no podemos hacer realmente), redefine nuestra concepción de la nada. Pero a diferencia del éter original, que fue introducido como un medio invisible para transportar las ondas de luz de forma muy similar a como el aire transporta las ondas de sonido, un océano de Higgs no tiene nada que ver con el movimiento de la luz; no afecta a la velocidad de la luz de ninguna manera, por lo que los experimentos de principios del siglo XX que descartaron el éter estudiando el movimiento de la luz no tienen ninguna relación con el océano de Higgs.

Además, como el océano de Higgs no tiene efecto sobre nada que se mueva a velocidad constante, no escoge un punto de observación como algo especial, como lo hizo el éter. En cambio, incluso con un océano de Higgs, todos los observadores de velocidad constante permanecen en un pie de igualdad, y por lo

tanto un océano de Higgs no entra en conflicto con la relatividad especial. Por supuesto, estas observaciones no prueban que los campos de Higgs existan; en cambio, muestran que a pesar de ciertas similitudes con el éter, los campos de Higgs no están en conflicto con ninguna teoría o experimento.

Sin embargo, si hay un campo de Higgs en el océano, debería producir otras consecuencias que serán comprobadas experimentalmente en los próximos años. Como ejemplo primario, así como los campos electromagnéticos están compuestos de fotones, los campos de Higgs están compuestos de partículas que, no es sorprendente, se llaman *partículas de Higgs.* Los cálculos teóricos han demostrado que si hay un espacio de permeabilidad oceánica de Higgs, las partículas de Higgs deberían estar entre los desechos de las colisiones de alta energía que tendrán lugar en el Gran Colisionador de Hadrones, un gigantesco desmenuzador de átomos que se está construyendo actualmente en el Centre Européène pour la Recherche Nuclaire (CERN) en Ginebra (Suiza), y que se prevé que entre en funcionamiento en 2007. En términos generales, las colisiones frontales enormemente energéticas entre protones deberían ser capaces de expulsar una partícula de Higgs del océano de Higgs, de la misma manera que las colisiones submarinas energéticas pueden expulsar las moléculas de H2Oéter existe o si seguirá el camino de su anterior encarnación. Esta es una cuestión crítica a resolver porque, como hemos visto, los campos de condensación de Higgs juegan un papel profundo y fundamental en nuestra actual formulación de la física fundamental.

Si no se encuentra el océano de Higgs, será necesario replantearse un marco teórico que ha estado en vigor durante más de treinta años. Pero si se encuentra, el evento será un triunfo para la física teórica: confirmará el poder de la simetría para dar forma correctamente a nuestro razonamiento matemático a medida que nos aventuramos en lo desconocido. Más allá de esto, la confirmación de la existencia del océano de Higgs también haría dos cosas más. En primer lugar, proporcionaría una evidencia directa de una antigua era en la que varios aspectos del universo actual que parecen distintos eran parte de un todo simétrico. Segundo, establecería que nuestra noción intuitiva de espacio vacío, el resultado final de eliminar todo lo que podamos de una región para que su energía y temperatura caigan lo más bajo posible, ha sido, durante mucho tiempo, ingenua. El espacio vacío más vacío no tiene por qué implicar un estado de absoluta nada. Por lo tanto, sin invocar lo espiritual, podemos muy bien rozar el pensamiento de Henry More (Capítulo 2) en nuestra búsqueda científica para entender el espacio y el tiempo. Para More, el concepto habitual de espacio vacío no tenía sentido porque el espacio siempre está lleno de espíritu divino. Para nosotros, el concepto habitual de espacio vacío puede ser igualmente evasivo, ya que el espacio vacío del que estamos al tanto siempre puede estar lleno de un océano del campo de Higgs.

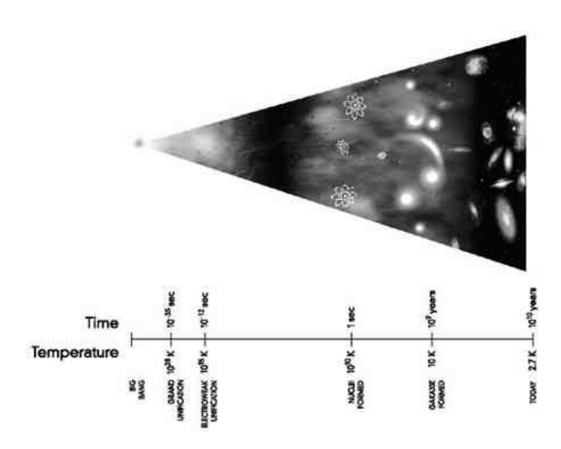


Figura 9.2 Una línea de tiempo que ilustra esquemáticamente el modelo estándar del big bang de la cosmología.

La entropía y el tiempo

La línea de tiempo de la figura 9.2 sitúa las transiciones de fase que hemos discutido en un contexto histórico y por lo tanto nos da una idea más firme de la secuencia de eventos por los que el universo ha pasado desde el big bang hasta el huevo en el mostrador de su cocina. Pero la información crucial sigue estando oculta dentro del parche borroso. Recuerda, saber cómo empiezan las cosas -el orden de la pila de páginas de *Guerra y Paz,* las moléculas de dióxido de carbono presurizadas en tu botella de Coca-Cola, el estado del universo en el big bang- es esencial para entender cómo evolucionan. La entropía puede aumentar sólo si se le da espacio para aumentar. La entropía puede aumentar sólo si comienza en un nivel bajo. Si las páginas de la *Guerra y la Paz comienzan completamente desordenadas*, más lanzamientos sólo las dejarán desordenadas; si el universo comenzó en un estado de alta entropía completamente desordenado, más evolución cósmica sólo mantendría el desorden.

La historia que se ilustra en la figura 9.2 no es manifiestamente una crónica de un desorden eterno e inmutable. Aunque se han perdido simetrías particulares a través de las transiciones de fase cósmicas, la entropía general del universo ha aumentado constantemente. Por lo tanto, al principio, el universo debe haber estado muy ordenado. Este hecho nos permite asociar "hacia adelante" en el tiempo con la dirección de la creciente entropía, pero todavía tenemos que encontrar una explicación para la increíblemente baja entropía -el increíblemente alto estado de uniformidad- del universo recién nacido. Esto requiere que vayamos incluso más atrás de lo que lo hemos hecho hasta ahora y tratemos de entender más de lo que ocurrió al principio -durante el borroso parche de la figura 9.2- una tarea a la que ahora nos dirigimos.

10 - Deconstruyendo el Bang

?

Una idea equivocada común es que el big bang proporciona una teoría de los orígenes cósmicos. No es así. El big bang es una teoría, en parte descrita en los dos últimos capítulos, que delinea la evolución cósmica a partir de una fracción de segundo después de lo que pasó para que el universo existiera, pero no *dice nada en absoluto sobre el propio tiempo cero*. Y como, según la teoría del big bang, el bang es lo que se supone que ocurrió al principio, el big bang deja fuera al bang. No nos dice nada sobre lo que ha explotado, por qué ha explotado, cómo ha explotado, o, francamente, si alguna vez ha explotado realmente. [1] De hecho, si lo piensas un momento, te darás cuenta de que el big bang nos presenta un gran rompecabezas. En las enormes densidades de materia y energía características de los primeros momentos del universo, la gravedad era, con mucho, la fuerza dominante. Pero la gravedad es una fuerza de atracción. Impulsa a las cosas a unirse. Entonces, ¿qué podría ser responsable de la fuerza exterior que impulsó al espacio a expandirse? Parecería que algún tipo de fuerza repulsiva poderosa debe haber jugado un papel crítico en el momento del estallido, pero ¿cuáles de las fuerzas de la naturaleza podrían ser?

Durante muchas décadas, la más básica de todas las preguntas cosmológicas quedó sin respuesta. Luego, en la década de 1980, una vieja observación de Einstein resucitó en una nueva y brillante forma, dando lugar a lo que se ha conocido como cosmología *inflacionaria.* Y con este descubrimiento, el crédito por el golpe pudo finalmente ser otorgado a la fuerza que lo merecía: *la gravedad.* Es sorprendente, pero los físicos se dieron cuenta de que en el entorno adecuado la gravedad puede ser repulsiva y, según la teoría, las condiciones necesarias prevalecieron durante los primeros momentos de la historia cósmica. Durante un intervalo de tiempo que haría que un nanosegundo pareciera una eternidad, el universo primitivo proporcionó un escenario en el que la gravedad ejerció su lado repulsivo con una venganza, alejando cada región del espacio de todas las demás con una ferocidad implacable. Tan poderoso fue el repulsivo empuje de la gravedad que no sólo se identificó el golpe, sino que se reveló como más grande, mucho más grande de lo que nadie había imaginado anteriormente. En el marco inflacionario, el universo primitivo se expandió por un factor asombrosamente enorme comparado con lo que predice la teoría estándar del big bang, ampliando nuestra visión cosmológica hasta un grado que empequeñeció la comprensión del siglo pasado de que la nuestra no es más que una galaxia entre cientos de miles de millones. [2]

En este y el siguiente capítulo, discutimos la cosmología inflacionaria. Veremos que proporciona un "front end" para el modelo estándar del big bang, ofreciendo modificaciones críticas a las afirmaciones de la teoría estándar sobre los eventos

durante los primeros momentos del universo. Al hacerlo, la cosmología inflacionaria resuelve cuestiones clave que están fuera del alcance del big bang estándar, hace una serie de predicciones que han sido y en un futuro próximo seguirán siendo probadas experimentalmente y, quizás lo más sorprendente, muestra cómo los procesos cuánticos pueden, a través de la expansión cosmológica, planchar diminutas arrugas en el tejido del espacio que dejan una huella visible en el cielo nocturno. Y más allá de estos logros, la cosmología inflacionaria da una visión significativa de cómo el universo primitivo puede haber adquirido su entropía extremadamente baja, llevándonos más cerca que nunca a una explicación de la flecha del tiempo.

Einstein y la gravedad repulsiva

Después de dar los últimos toques a la relatividad general en 1915, Einstein aplicó sus nuevas ecuaciones para la gravedad a una variedad de problemas. Uno de ellos era el viejo rompecabezas de que las ecuaciones de Newton no podían explicar la llamada precesión del perihelio de la órbita de Mercurio: el hecho observado de que Mercurio no traza el mismo camino cada vez que orbita el sol: en cambio, cada órbita sucesiva se desplaza ligeramente con respecto a la anterior. Cuando Einstein redefinió los cálculos orbitales estándar con sus nuevas ecuaciones, dedujo la precesión del perihelio observada con precisión, un resultado que encontró tan emocionante que le produjo palpitaciones cardíacas. [3] Einstein también aplicó la relatividad general a la pregunta de cuán bruscamente el camino de la luz emitida por una estrella distante se doblaría por la curvatura del espaciotiempo al pasar por el sol en su camino hacia la tierra. En 1919, dos equipos de astrónomos -uno acampado en la isla de Príncipe, frente a la costa occidental de África, y el otro en el Brasil- pusieron a prueba esta predicción durante un eclipse de sol comparando las observaciones de la luz de las estrellas que apenas rozaban la superficie del sol (estos son los rayos de luz más afectados por la presencia del sol, y sólo durante un eclipse son visibles) con las fotografías tomadas cuando la órbita terrestre la había colocado entre esas mismas estrellas y el sol, eliminando prácticamente el impacto gravitatorio del sol en la trayectoria de la luz de las estrellas. La comparación reveló un ángulo de flexión que, una vez más, confirmó los cálculos de Einstein. Cuando la prensa se enteró del resultado, Einstein se convirtió de la noche a la mañana en una celebridad de renombre mundial. Con la relatividad general, es justo decir, Einstein estaba en racha.

Sin embargo, a pesar de los crecientes éxitos de la relatividad general, durante años después de que aplicara por primera vez su teoría al más inmenso de todos los desafíos -comprender el universo entero-, Einstein se negó absolutamente a aceptar la respuesta que surgió de las matemáticas. Antes de los trabajos de Friedmann y Lemaître discutidos en el Capítulo 8, Einstein también se había dado cuenta de que las ecuaciones de la relatividad general mostraban que el universo

no podía ser estático; el tejido del espacio podía estirarse o encogerse, pero no podía mantener un tamaño fijo. Esto sugería que el universo podría haber tenido un comienzo definido, cuando el tejido se comprimía al máximo, e incluso podría tener un final definido. Einstein se negó obstinadamente a esta consecuencia de la relatividad general, porque él y todos los demás "sabían" que el universo era eterno y, en la mayor de las escalas, fijo e inmutable. Así pues, a pesar de la belleza y los éxitos de la relatividad general, Einstein reabrió su cuaderno y buscó una modificación de las ecuaciones que permitiera un universo que se ajustara al prejuicio imperante. No le tomó mucho tiempo. En 1917 logró el objetivo introduciendo un nuevo término en las ecuaciones de la relatividad general: la constante cosmológica. [4]

La estrategia de Einstein para introducir esta modificación no es difícil de comprender. La fuerza gravitatoria entre dos objetos cualesquiera, ya sean pelotas de béisbol, planetas, estrellas, cometas, o lo que sea, es atractiva, y como resultado, la gravedad actúa constantemente para atraer los objetos entre sí. La atracción gravitatoria entre la Tierra y una bailarina que salta hacia arriba hace que la bailarina vaya más despacio, alcance una altura máxima y luego vuelva a bajar. Si un coreógrafo quiere una configuración estática en la que el bailarín flota en el aire, tendría que haber una fuerza de repulsión entre el bailarín y la Tierra que equilibrara con precisión su atracción gravitatoria: una configuración estática sólo puede surgir cuando hay una cancelación perfecta entre la atracción y la repulsión. Einstein se dio cuenta de que exactamente el mismo razonamiento se aplica a todo el universo. De la misma manera que la atracción de la gravedad actúa para frenar el ascenso de la bailarina, también actúa para frenar la expansión del espacio. Y así como el bailarín no puede lograr la estasis, no puede flotar a una altura fija, sin una fuerza de repulsión que equilibre la atracción habitual de la gravedad, el espacio no puede ser estático, el espacio no puede flotar a un tamaño general fijo, sin que también haya algún tipo de fuerza de repulsión que lo equilibre. Einstein introdujo la constante cosmológica porque encontró que con este nuevo término incluido en las ecuaciones, la gravedad podría proporcionar una fuerza de repulsión de este tipo.

¿Pero qué física representa este término matemático? ¿Cuál es la constante cosmológica, de qué está hecha, y cómo se las arregla para ir en contra de la veta de la habitual gravedad atractiva y ejercer un repulsivo empuje hacia afuera? Bueno, la lectura moderna de la obra de Einstein, que se remonta a Lemaître, interpreta la constante cosmológica como una forma exótica de energía que llena de manera uniforme y homogénea todo el espacio. Digo "exótica" porque el análisis de Einstein no especificaba de dónde podía venir esta energía y, como veremos en breve, la descripción matemática que invocaba aseguraba que no podía estar compuesta de nada familiar como protones, neutrones, electrones o fotones. Los físicos de hoy en día invocan frases como "la energía del espacio mismo" o "energía oscura" al discutir el significado de la constante cosmológica de Einstein, porque si hubiera una constante cosmológica, el espacio estaría lleno de

una presencia transparente y amorfa que no se podría ver directamente; el espacio lleno de una constante cosmológica seguiría pareciendo oscuro. (Esto se asemeja a la vieja noción de un éter y a la más reciente noción de un campo de Higgs que ha adquirido un valor distinto de cero en todo el espacio. Esta última similitud es más que una mera coincidencia ya que hay una importante conexión entre una constante cosmológica y los campos de Higgs, a la que llegaremos en breve). Pero incluso sin especificar el origen o la identidad de la constante cosmológica, Einstein fue capaz de elaborar sus implicaciones gravitatorias, y la respuesta que encontró fue notable.

Para entenderlo, hay que ser consciente de un rasgo de la relatividad general que todavía tenemos que discutir. En la aproximación de Newton a la gravedad, la fuerza de atracción entre dos objetos depende únicamente de dos cosas: sus masas y la distancia entre ellas. Cuanto más masivos son los objetos y más cerca están, mayor es la atracción gravitatoria que ejercen entre ellos. La situación en relatividad general es muy similar, excepto que las ecuaciones de Einstein muestran que el enfoque de Newton sobre la masa era demasiado limitado. Según la relatividad general, no es sólo la masa (y la separación) de los objetos lo que contribuye a la fuerza del campo gravitatorio. *La energía* y *la presión* también contribuyen. Esto es importante, así que dediquemos un momento a ver qué significa.

Imagina que es el siglo 25 y que estás siendo retenido en el Salón de los Ingenieros, el más reciente experimento del Departamento de Correccionales que emplea un enfoque meritocrático para disciplinar a los delincuentes de cuello blanco. A los convictos se les da un rompecabezas, y sólo pueden recuperar su libertad resolviéndolo. El tipo de la celda de al lado tiene que averiguar por qué las repeticiones de *Gilligan's Island volvieron por sorpresa* en el siglo XXII y han sido el espectáculo más popular desde entonces, por lo que es probable que llame a la casa de los Hall durante bastante tiempo. Su rompecabezas es más simple. Se le dan dos cubos idénticos de oro macizo, son del mismo tamaño y cada uno está hecho precisamente de la misma cantidad de oro. Su desafío es encontrar una manera de hacer que los cubos registren diferentes pesos cuando se apoyan suavemente en una escala fija, exquisitamente precisa, sujeto a una estipulación: no se permite cambiar la cantidad de materia en ninguno de los cubos, por lo que no debe haber astillado, raspado, soldado, afeitado, etc. Si le planteara este rompecabezas a Newton, él inmediatamente declararía que no tiene solución. Según las leyes de Newton, cantidades idénticas de oro se traducen en masas idénticas. Y puesto que cada cubo descansará en la misma escala fija, la atracción gravitatoria de la Tierra sobre ellos será idéntica. Newton concluiría que los dos cubos deben registrar un peso idéntico, sin "si", "y" o "pero".

Sin embargo, con tu conocimiento de la relatividad general del siglo XX en el instituto, ves una salida. La relatividad general muestra que la fuerza de la atracción gravitatoria entre dos objetos no sólo depende de sus masas [5] (y su

separación), sino también de todas y cada una de las contribuciones adicionales a la *energía*total de cada objeto*.* Y hasta ahora no hemos dicho nada sobre la temperatura de los cubos de oro. La temperatura es una medida de cuán rápido, en promedio, los átomos de oro que componen cada cubo se mueven de un lado a otro, es una medida de cuán energéticos son los átomos (refleja su energía cinética). Así, te das cuenta de que si calientas un cubo, sus átomos serán más energéticos, por lo que pesará un poco más que el cubo más frío. Este es un hecho del que Newton no era consciente (un aumento de 10 grados centígrados aumentaría el peso de un cubo de una libra de oro en una millonésima de una billonésima de libra, por lo que el efecto es minúsculo), y con esta solución se gana la liberación de la Sala.

Bueno, casi. Debido a que su crimen fue particularmente retorcido, en el último minuto la junta de libertad condicional decide que debe resolver un segundo rompecabezas. Se te dan dos juguetes idénticos de la vieja caja, y tu nuevo reto es encontrar la manera de hacer que cada uno tenga un peso diferente. Pero en esta vuelta, no sólo se le prohíbe cambiar la cantidad de masa en cualquiera de los objetos, sino que también se le exige mantener ambos a exactamente la misma temperatura. Una vez más, si Newton recibiera este rompecabezas, se resignaría inmediatamente a la vida en el Salón. Como los juguetes tienen masas idénticas, concluiría que sus pesos son idénticos, por lo que el rompecabezas es insoluble. Pero una vez más, su conocimiento de la relatividad general viene al rescate: En uno de los juguetes comprimes el resorte, apretando fuertemente a Jack bajo la tapa cerrada, mientras que en el otro dejas a Jack en su postura de salto. ¿Por qué? Bueno, un resorte comprimido tiene más energía que uno no comprimido; tuviste que ejercer energía para apretar el resorte hacia abajo y puedes ver la evidencia de tu trabajo porque el resorte comprimido ejerce presión, causando que la tapa del juguete se estire ligeramente hacia afuera. Y, de nuevo, según Einstein, *cualquier* energía adicional afecta a la gravedad, resultando en un peso adicional. Por lo tanto, el "Jack-in-the-box" cerrado, con su resorte comprimido ejerciendo una presión hacia afuera, pesa un poco más que el "Jack-in-the-box" abierto, con su resorte no comprimido. Esta es una realización que se le habría escapado a Newton, y con ella finalmente *recuperas* tu libertad.

La solución de este segundo rompecabezas apunta a la sutil pero crítica característica de la relatividad general que buscamos. En su trabajo de presentación de la relatividad general, Einstein demostró matemáticamente que la fuerza gravitatoria no sólo depende de la masa, y no sólo de la energía (como el calor), sino también de cualquier *presión* que pueda ser ejercida. Y esta es la física esencial que necesitamos si queremos entender la constante cosmológica. Aquí está el porqué. La presión dirigida hacia el exterior, como la ejercida por un resorte comprimido, se llama *presión positiva.* Naturalmente, la presión positiva contribuye positivamente a la gravedad. Pero, y este es el punto crítico, hay situaciones en las que la presión en una región, a diferencia de la masa y la energía total, puede ser *negativa, lo que significa* que la presión aspira hacia

adentro en lugar de empujar hacia afuera. Y aunque esto puede no sonar particularmente exótico, la presión negativa puede resultar en algo extraordinario desde el punto de vista de la relatividad general: *mientras que la presión positiva contribuye a la gravedad atractiva ordinari*a, la presión negativa *contribuye a la gravedad "negativa",* es decir, ¡a la gravedad repulsiva! [6]

Con esta sorprendente comprensión, la relatividad general de Einstein expuso una laguna en la creencia de más de doscientos años de antigüedad de que la gravedad es siempre una fuerza de atracción. Los planetas, estrellas y galaxias, como Newton mostró correctamente, ciertamente ejercen una atracción gravitatoria atractiva. Pero cuando la presión se vuelve importante (para la materia ordinaria en condiciones cotidianas, la contribución gravitatoria de la presión es insignificante) y, en particular, cuando la presión es negativa (para la materia ordinaria como los protones y los electrones, la presión es positiva, por lo que la constante cosmológica no puede estar compuesta por nada familiar) hay una contribución a la gravedad que habría chocado a Newton. Es repulsivo.

Este resultado es central para gran parte de lo que sigue y es fácilmente incomprensible, así que permítanme enfatizar un punto esencial. La gravedad y la presión son dos personajes relacionados pero separados en esta historia. Las presiones, o más precisamente, las diferencias de presión, pueden ejercer sus propias fuerzas no gravitacionales. Cuando se bucea bajo el agua, los tímpanos pueden sentir la diferencia de presión entre el agua que les empuja desde el exterior y el aire que les empuja desde el interior. Todo eso es cierto. Pero lo que estamos diciendo sobre la presión y la gravedad es completamente diferente. Según la relatividad general, la presión puede ejercer indirectamente otra fuerza, puede ejercer una fuerza gravitatoria, porque la presión contribuye al campo gravitatorio. La presión, al igual que la masa y la energía, es una fuente de gravedad. Y sorprendentemente, si la presión en una región es negativa, contribuye un *empuje gravitaciona*l al campo gravitacional que impregna la región, no una atracción gravitacional.

Esto significa que cuando la presión es negativa, hay una competencia entre la gravedad atractiva ordinaria, que surge de la masa y la energía ordinaria, y la gravedad repulsiva exótica, que surge de la presión negativa. Si la presión negativa en una región es lo suficientemente negativa, la gravedad repulsiva dominará; la gravedad separará las cosas en lugar de unirlas. Aquí es donde la constante cosmológica entra en la historia. El término cosmológico Einstein añadido a las ecuaciones de la relatividad general significaría que el espacio está uniformemente impregnado de energía pero, crucialmente, las ecuaciones muestran que esta energía tiene una presión uniforme y negativa. Es más, la repulsión gravitatoria de la presión negativa de la constante cosmológica supera la atracción gravitatoria procedente de su energía positiva, por lo que la gravedad repulsiva gana la competición: *una constante cosmológica* ejerce una fuerza gravitatoria repulsiva general. [7]

Para Einstein, esto fue justo lo que el doctor ordenó. La materia ordinaria y la radiación, esparcidas por todo el universo, ejercen una fuerza gravitatoria atractiva, causando que cada región del espacio *tire de todas las* demás. El nuevo término cosmológico, que él imaginó que también se extendía uniformemente por todo el universo, ejerce una fuerza gravitatoria repulsiva, causando que cada región del espacio s*empuje entre sí*. Al elegir cuidadosamente el tamaño del nuevo término, Einstein descubrió que podía equilibrar con precisión la habitual fuerza gravitatoria de atracción con la recién descubierta fuerza gravitatoria de repulsión, y producir un universo estático.

Además, debido a que la nueva fuerza gravitatoria repulsiva surge de la energía y la presión en el propio espacio, Einstein descubrió que su fuerza es acumulativa; la fuerza se hace más fuerte en separaciones espaciales más grandes, ya que más espacio intermedio significa más empuje hacia afuera. En las escalas de distancias de la Tierra o de todo el sistema solar, Einstein demostró que la nueva fuerza gravitatoria de repulsión es inconmensurablemente pequeña. Sólo adquiere importancia en grandes extensiones cosmológicas, preservando así todos los éxitos de la teoría de Newton y de su propia relatividad general cuando se aplican más cerca de casa. En resumen, Einstein descubrió que podía tener su pastel y comérselo también: podía mantener todos los atractivos rasgos confirmados experimentalmente de la relatividad general mientras se deleitaba con la eterna serenidad de un cosmos inalterable, que no se expandía ni se contraía.

Con este resultado, Einstein sin duda dio un suspiro de alivio. Qué desgarrador hubiera sido si la década de agotadora investigación que había dedicado a formular la relatividad general resultara en una teoría incompatible con el universo estático aparente para cualquiera que mirara al cielo nocturno. Pero, como hemos visto, una docena de años más tarde la historia dio un giro brusco. En 1929, Hubble demostró que las miradas rápidas al cielo pueden ser engañosas. Sus observaciones sistemáticas revelaron que el universo *no* es estático. Se *está* expandiendo. Si Einstein hubiera confiado en las ecuaciones originales de la relatividad general, habría predicho la expansión del universo más de una década antes de que fuera descubierto observacionalmente. Eso ciertamente se habría clasificado entre los mayores descubrimientos - podría haber sido *el* mayor descubrimiento - de todos los tiempos. Después de conocer los resultados de Hubble, Einstein arruinó el día en que había pensado en la constante cosmológica, y la borró cuidadosamente de las ecuaciones de la relatividad general. Quería que todo el mundo olvidara el lamentable episodio, y durante muchas décadas todo el mundo lo hizo.

Sin embargo, en la década de 1980, la constante cosmológica resurgió en una nueva y sorprendente forma y dio lugar a uno de los más dramáticos cambios en el pensamiento cosmológico desde que nuestra especie se involucró por primera vez en el pensamiento cosmológico.

de ranas saltarinas y superenfriamiento

Si vieras una pelota de béisbol volando hacia arriba, podrías usar la ley de la gravedad de Newton (o las ecuaciones más refinadas de Einstein) para calcular su trayectoria posterior. Y si realizas los cálculos necesarios, tendrías una sólida comprensión del movimiento de la pelota. Pero todavía habría una pregunta sin respuesta: ¿Quién o qué lanzó la bola hacia arriba en primer lugar? ¿Cómo adquirió la bola el movimiento inicial hacia arriba cuyo posterior despliegue has evaluado matemáticamente? En este ejemplo, un poco más de investigación es todo lo que generalmente se necesita para encontrar la respuesta (a menos, por supuesto, que los aspirantes a grandes ligas se den cuenta de que la pelota que acaba de golpear está en un curso de colisión con el parabrisas de un Mercedes estacionado). Pero una versión más difícil de una pregunta similar persigue la explicación de la relatividad general sobre la expansión del universo.

Las ecuaciones de la relatividad general, tal y como fueron mostradas originalmente por Einstein, el físico holandés Willem de Sitter y, posteriormente, Friedmann y Lemaître, permiten un universo en expansión. Pero, al igual que las ecuaciones de Newton no nos dicen nada sobre cómo comenzó el viaje ascendente de una pelota, las ecuaciones de Einstein no nos dicen nada sobre cómo comenzó la expansión del universo. Durante muchos años, los cosmólogos tomaron la expansión inicial hacia el exterior del espacio como un hecho inexplicable, y simplemente trabajaron las ecuaciones hacia adelante desde allí. Esto es lo que quise decir antes cuando dije que el big bang es silencioso en el bang.

Tal fue el caso hasta una fatídica noche de diciembre de 1979, cuando Alan Guth, un becario postdoctoral en física que trabajaba en el Centro de Aceleradores Lineales de Stanford (ahora es profesor en el MIT), demostró que podemos hacerlo mejor. Mucho mejor. Aunque hay detalles que hoy, más de dos décadas después, aún no se han resuelto completamente, Guth hizo un descubrimiento que finalmente llenó el silencio cosmológico proporcionando un big bang, y que fue más grande de lo que nadie esperaba.

Guth no fue entrenado como cosmólogo. Su especialidad era la física de partículas, y a finales de los 70, junto con Henry Tye de la Universidad de Cornell, estudiaba varios aspectos de los campos de Higgs en grandes teorías unificadas. Recuerde desde el último capítulo de la discusión de la ruptura de la simetría espontánea que un campo de Higgs contribuye con la menor energía posible que puede a una región del espacio cuando su valor se establece a un número particular no cero (un número que depende de la forma detallada de su tazón de energía potencial). En el universo primitivo, cuando la temperatura era extraordinariamente alta, discutimos cómo el valor de un campo de Higgs fluctuaría salvajemente de un número a otro, como la rana en el cuenco de metal

caliente cuyas patas se estaban chamuscando, pero a medida que el universo se enfriaba, el Higgs bajaba por el cuenco hasta un valor que minimizaba su energía.

Guth y Tye estudiaron las razones por las que el campo de Higgs podría retrasarse para alcanzar la configuración menos energética (el valle del tazón en la figura 9.1c). Si aplicamos la analogía de la rana a la pregunta que Guth y Tye hicieron, fue esta: ¿qué pasaría si la rana, en uno de sus primeros saltos cuando el cuenco empezaba a enfriarse, simplemente aterrizara en la meseta central? ¿Y si, mientras el tazón seguía enfriándose, la rana se quedó en la meseta central (comiendo gusanos sin prisa), en lugar de deslizarse hacia el valle del tazón? O, en términos físicos, ¿qué pasaría si el valor de un campo de Higgs fluctuante aterrizara en la meseta central del cuenco de energía y permaneciera allí mientras el universo continúa enfriándose? Si esto ocurre, los físicos dicen que el campo de Higgs se ha *súper-enfriado,* indicando que aunque la temperatura del universo ha bajado hasta el punto en el que se esperaría que el valor de Higgs se acercara al valle de baja energía, permanece atrapado en una configuración de mayor energía. (Esto es análogo al agua altamente purificada, que puede ser superenfriada por debajo de los 0 grados Celsius, la temperatura a la que esperarías que se convirtiera en hielo, y aún así permanecería líquida porque la formación de hielo requiere pequeñas impurezas alrededor de las cuales los cristales pueden crecer).

Guth y Tye estaban interesados en esta posibilidad porque sus cálculos sugerían que podría ser relevante para un problema (el problema del *monopolo magnético* [8]) que los investigadores habían encontrado con varios intentos de gran unificación. Pero Guth y Tye se dieron cuenta de que podría haber otra implicación y, en retrospectiva, por eso su trabajo resultó ser fundamental. Sospecharon que la energía asociada con un campo de Higgs superenfriado -recuerden, la altura del campo representa su energía, por lo que el campo tiene cero energía sólo si su valor se encuentra en el valle del tazón- podría tener un efecto en la expansión del universo. A principios de diciembre de 1979, Guth siguió esta corazonada, y esto es lo que encontró.

Un campo de Higgs que ha quedado atrapado en una meseta no sólo impregna el espacio con energía, sino que, de crucial importancia, Guth se dio cuenta de que también contribuye a una *presión negativa uniforme.* De hecho, encontró que en lo que respecta a la energía y la presión, un campo de Higgs que ha quedado atrapado en una meseta tiene las mismas propiedades que una constante cosmológica: impregna el espacio con energía y presión negativa, y en exactamente las mismas proporciones que una constante cosmológica. Así que Guth descubrió que un campo de Higgs superenfriado tiene un efecto importante en la expansión del espacio: como una constante cosmológica, ejerce una fuerza gravitatoria repulsiva que impulsa al espacio a expandirse. [9]

En este punto, como ya estás familiarizado con la presión negativa y la gravedad repulsiva, puedes estar pensando, Está bien, es bueno que Guth haya encontrado un mecanismo físico específico para realizar la idea de Einstein de una constante cosmológica, pero ¿y qué? ¿Cuál es el problema? El concepto de una constante cosmológica había sido abandonado hace mucho tiempo. Su introducción en la física no fue más que una vergüenza para Einstein. ¿Por qué emocionarse al redescubrir algo que había sido desacreditado más de seis décadas antes?

Inflación

Bueno, aquí está el porqué. Aunque un campo de Higgs superenfriado comparte ciertas características con una constante cosmológica, Guth se dio cuenta de que no son completamente idénticas. En su lugar, hay dos diferencias clave, diferencias que hacen toda la diferencia.

En primer lugar, mientras que una constante cosmológica es constante - no varía con el tiempo, por lo que proporciona un constante e invariable empuje hacia afuera - un campo de Higgs superenfriado no tiene por qué ser constante. Piense en una rana encaramada en la protuberancia de la figura 10.1a. Puede permanecer allí durante un tiempo, pero tarde o temprano un salto aleatorio de esta manera o de aquella -un salto dado no porque el bol esté caliente (ya no lo está), sino simplemente porque la rana se reubica- impulsará a la rana más allá de la protuberancia, tras lo cual se deslizará hasta el punto más bajo del bol, como en la figura 10.1b. Un campo de Higgs puede comportarse de manera similar. Su valor a través de todo el espacio puede quedarse atascado en la protuberancia central de su tazón de energía, mientras que la temperatura baja demasiado como para provocar una agitación térmica significativa. Pero los procesos cuánticos inyectarán saltos aleatorios en el valor del campo de Higgs, y un salto lo suficientemente grande lo impulsará fuera de la meseta, permitiendo que su energía y presión se relajen a cero.[10] Los cálculos de Guth mostraron que, dependiendo de la forma precisa del salto del tazón, este salto podría haber ocurrido rápidamente, quizás en un tiempo tan corto como .00000000000000000000000000000000001 (10^{-35}) segundos. Posteriormente, Andrei Linde, que trabajaba entonces en el Instituto de Física Lebedev de Moscú, y Paul Steinhardt, que trabajaba entonces con su estudiante Andreas Albrecht en la Universidad de Pensilvania, descubrieron una forma de que la relajación del campo de Higgs a energía y presión cero en todo el espacio se produjera de forma aún más eficiente y significativamente más uniforme (curando así ciertos problemas técnicos inherentes a la propuesta original de Guth [11]). Mostraron que si el tazón de energía potencial hubiera sido más suave y con una inclinación más gradual, como en la figura 10.2, no habría sido necesario realizar saltos cuánticos: el valor del campo de Higgs rodaría rápidamente hacia el valle, de forma muy parecida a una pelota que baja por una colina. El resultado es que si un campo de

Higgs actuaba como una constante cosmológica, lo hacía sólo por un breve momento.



Figura 10.1 **(** a **)** Un campo de Higgs superenfriado es aquel cuyo valor queda atrapado en la meseta de alta energía del cuenco de energía, como la rana en un bache.**(** b **)** Típicamente, un campo de Higgs superenfriado encontrará rápidamente su camino fuera de la meseta y caerá a un valor con menor energía, como la rana que salta del salto.

La segunda diferencia es que mientras que Einstein eligió cuidadosa y arbitrariamente el valor de la constante cosmológica -la cantidad de energía y presión negativa que contribuyó a cada volumen de espacio- para que su fuerza repulsiva exterior equilibrara precisamente la fuerza de atracción interior que surge de la materia ordinaria y la radiación en el cosmos, Guth pudo estimar la energía y la presión negativa que contribuyó a los campos de Higgs que él y Tye habían estado estudiando. Y la respuesta que encontró fue más de 1000000000000000000000000000000000000000000 0000000000000000000000000000000000000000000000000000000000 (10^{100}) veces más grande que el valor que Einstein había elegido. Este número es enorme, obviamente, y por lo tanto el empuje hacia afuera suministrado por la gravedad repulsiva del campo de Higgs es *monumental* en comparación con lo que Einstein previó originalmente con la constante cosmológica.



Figura 10.2 Una protuberancia más suave y con una inclinación más gradual permite que el valor del campo de Higgs ruede hacia abajo hasta el valle de energía cero con mayor facilidad y de manera más uniforme en todo el espacio.

Ahora, si combinamos estas dos observaciones - que el campo de Higgs permanecerá en la meseta, en el estado de alta energía y presión negativa, sólo

por el más breve de los instantes, y que mientras está en la meseta, el repulsivo empuje hacia afuera que genera es enorme - ¿qué tenemos? Bueno, como Guth se dio cuenta, tenemos un fenomenal y efímero estallido hacia afuera. En otras palabras, tenemos exactamente lo que le faltaba a la teoría del big bang: un *bang,* y uno muy grande. Es por eso que el descubrimiento de Guth es algo para entusiasmarse. [12]

El cuadro cosmológico que surge del avance de Guth es, por lo tanto, el siguiente. Hace mucho tiempo, cuando el universo era enormemente denso, su energía era transportada por un campo de Higgs situado en un valor muy alejado del punto más bajo de su tazón de energía potencial. Para distinguir este campo Higgs particular de otros (como el campo Higgs electrodependiente responsable de dar masa a las especies de partículas familiares, o el campo Higgs que surge en las grandes teorías unificadas [13]) se le suele llamar el campo de inflado. [25] Debido a su presión negativa, el campo inflado generó una gigantesca repulsión gravitatoria que impulsó a cada región del espacio a alejarse de todas las demás; en el lenguaje de Guth, el inflado impulsó al universo a inflarse. La repulsión duró sólo unos $10^{\text{a } 35}$ segundos, pero fue tan poderosa que incluso en ese breve momento el universo se hinchó por un factor enorme. Dependiendo de detalles como la forma precisa de la energía potencial del campo de inflado, el universo podría haberse expandido fácilmente por un factor de 10^{30}, 10^{50}, o 10^{100} o más.

Estos números son asombrosos. Un factor de expansión de 10^{30} -una estimación conservadora- sería como escalar una molécula de ADN hasta aproximadamente el tamaño de la Vía Láctea, y en un intervalo de tiempo mucho más corto que una milmillonésima de una milmillonésima de un parpadeo. En comparación, incluso este factor de expansión conservador es miles de millones y miles de millones de veces la expansión que habría ocurrido según la teoría del big bang estándar durante el mismo intervalo de tiempo, ¡y supera el factor de expansión total que ha ocurrido acumulativamente durante los 14.000 millones de años siguientes! En los muchos modelos de inflación en los que el factor de expansión calculado es mucho mayor que 10^{30}, la expansión espacial resultante es tan enorme que la región que podemos ver, incluso con el telescopio más potente posible, no es más que una diminuta fracción de todo el universo. De acuerdo con estos modelos, nada de la luz emitida por la gran mayoría del universo podría haber llegado a nosotros todavía, y mucha de ella no llegará hasta mucho después de que el sol y la tierra se hayan extinguido. Si todo el cosmos se redujera al tamaño de la Tierra, la parte accesible para nosotros sería mucho más pequeña que un grano de arena.

Aproximadamente 10^{-35} segundos después de que la explosión comenzara, el campo de inflado encontró su camino fuera de la meseta de alta energía y su valor a través del espacio se deslizó hasta el fondo del tazón, apagando el empuje repulsivo. Y a medida que el valor del inflado bajaba, cedió su energía acumulada a la producción de partículas ordinarias de materia y radiación - como una niebla

que se asentaba en la hierba como rocío matutino - que llenaba uniformemente el espacio en expansión. [14] A partir de este punto, la historia es esencialmente la de la teoría estándar del big bang: el espacio continuó expandiéndose y enfriándose después del estallido, permitiendo que las partículas de materia se agruparan en estructuras como galaxias, estrellas y planetas, que se fueron organizando lentamente en el universo que vemos actualmente, como se ilustra en la Figura 10.3.

El descubrimiento de Guth, llamado cosmología *inflacionaria,* junto con las importantes mejoras aportadas por Linde, y por Albrecht y Steinhardt, proporcionó una explicación de lo que hizo que el espacio se expandiera en primer lugar. Un campo de Higgs situado por encima de su valor de energía cero puede proporcionar una explosión hacia el exterior que haga que el espacio se hinche. Guth proporcionó al big bang un bang.

El marco inflacionario

El descubrimiento de Guth fue rápidamente aclamado como un gran avance y se ha convertido en un elemento dominante de la investigación cosmológica. Pero noten dos cosas. Primero, en el modelo estándar del big bang, el bang supuestamente ocurrió en el tiempo cero, en el mismo comienzo del universo, por lo que se ve como el evento de la creación. Pero al igual que un cartucho de dinamita sólo explota cuando está debidamente iluminado, en la cosmología inflacionaria el bang sólo ocurrió cuando las condiciones eran las correctas - cuando había un campo inflado cuyo valor proporcionaba la energía y la presión negativa que alimentaba el estallido exterior de la gravedad repulsiva - y que no tenía por qué haber coincidido con la "creación" del universo. Por esta razón, el estallido inflacionario se piensa mejor como *un* evento que el universo preexistente experimentó, pero no necesariamente como *el* evento que creó el universo. Denotamos esto en la figura 10.3 manteniendo algunos de los parches borrosos de la figura 9.2, lo que indica nuestra continua ignorancia del origen fundamental: específicamente, si la cosmología inflacionaria es correcta, nuestra ignorancia de por qué hay un campo de inflado, por qué su potencial tazón de energía tiene la forma correcta para que la inflación haya ocurrido, por qué hay espacio y tiempo dentro del cual toda la discusión tiene lugar, y, en la frase más grandiosa de Leibniz, por qué hay algo en lugar de nada.

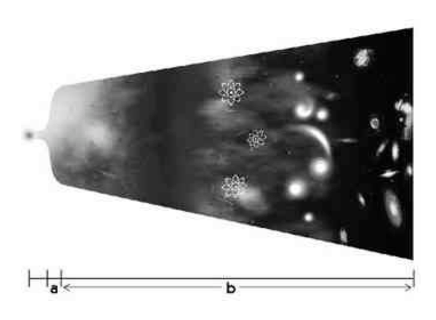


Figura 10.3 inflacionaria inserta un rápido y enorme estallido de expansión espacial al principio de la historia del universo. **)** Tras el estallido, la evolución del universo se fusiona con la evolución estándar teorizada en el modelo del big bang.

Una segunda observación relacionada es que la cosmología inflacionaria no es una teoría única y exclusiva. Más bien es un marco cosmológico construido alrededor de la comprensión de que la gravedad puede ser repulsiva y por lo tanto puede conducir a una hinchazón del espacio. Los detalles precisos del estallido exterior -cuándo ocurrió, cuánto tiempo duró, la fuerza del empuje exterior, el factor por el cual el universo se expandió durante el estallido, la cantidad de energía que el inflatón depositó en la materia ordinaria cuando el estallido llegó a su fin, y así sucesivamente- dependen de detalles, en particular el tamaño y la forma de la energía potencial del campo de inflado, que actualmente están más allá de nuestra capacidad de determinar sólo a partir de consideraciones teóricas. Durante muchos años los físicos han estudiado todo tipo de posibilidades, diversas formas de la energía potencial, varios números de campos de inflado que funcionan en tándem, y así sucesivamente, y han determinado qué elecciones dan lugar a teorías consistentes con las observaciones astronómicas. Lo importante es que hay aspectos de las teorías cosmológicas inflacionarias que trascienden los detalles y por lo tanto son comunes a esencialmente cualquier realización. El estallido exterior en sí mismo, por definición, es una de esas características, y por lo tanto cualquier modelo inflacionario viene con un estallido. Pero hay otras características inherentes a todos los modelos inflacionarios que son vitales porque resuelven problemas importantes que han desconcertado a la cosmología del big bang estándar.

La inflación y el problema del horizonte

Uno de estos problemas se llama el *problema del* horizonte y tiene que ver con la uniformidad de la radiación de fondo de microondas con la que nos encontramos anteriormente. Recordemos que la temperatura de la radiación de microondas que nos llega desde una dirección en el espacio coincide con la que viene desde cualquier otra dirección con una precisión fantástica (mejor que una milésima de grado). Este hecho observacional es fundamental, porque atestigua la

homogeneidad en todo el espacio, permitiendo enormes simplificaciones en los modelos teóricos del cosmos. En los capítulos anteriores, utilizamos esta homogeneidad para reducir drásticamente las posibles formas del espacio y para argumentar a favor de un tiempo cósmico uniforme. El problema surge cuando intentamos explicar *cómo* el universo se volvió tan uniforme. ¿Cómo es que regiones muy distantes del universo se han dispuesto para tener temperaturas casi idénticas?

Si pensamos en el capítulo 4, una posibilidad es que así como el entrelazamiento cuántico no local puede correlacionar los giros de dos partículas ampliamente separadas, tal vez también pueda correlacionar las temperaturas de dos regiones del espacio ampliamente separadas. Aunque es una sugerencia interesante, la tremenda dilución del entrelazamiento en todos los entornos, excepto en los más controlados, como se discute al final de ese capítulo, esencialmente lo descarta. Bien, quizás haya una explicación más simple. Tal vez hace mucho tiempo, cuando cada región del espacio estaba más cerca una de la otra, sus temperaturas se igualaban a través de su contacto cercano, de la misma manera que una cocina caliente y una sala de estar fría llegan a la misma temperatura cuando una puerta entre ellas se abre por un tiempo. Sin embargo, en la teoría estándar del big bang, esta explicación también falla. Aquí hay una manera de pensar en ello.

Imagina ver una película que muestra el curso completo de la evolución cósmica desde el principio hasta hoy. Haga una pausa en la película en algún momento arbitrario y pregúntese: ¿Podrían dos regiones particulares del espacio, como la cocina y la sala de estar, haber influido en la temperatura de cada una? ¿Podrían haber intercambiado luz y calor? La respuesta depende de dos cosas: La distancia entre las regiones y la cantidad de tiempo que ha transcurrido desde la explosión. Si su separación es menor que la distancia que la luz pudo haber recorrido en el tiempo desde el bang, entonces las regiones podrían haberse influido mutuamente; de lo contrario, no podrían hacerlo. Ahora, podrías pensar que *todas las regiones* del universo observable podrían haber interactuado entre sí desde el principio porque cuanto más atrás se enrolla la película, más se acercan las regiones y por lo tanto es más fácil que interactúen. Pero este razonamiento es demasiado rápido; no tiene en cuenta el hecho de que no sólo las regiones del espacio estaban más cerca, sino que también había menos tiempo para que se comunicaran.

Para hacer un análisis adecuado, imagínese correr la película cósmica en reversa mientras se enfoca en dos regiones del espacio que actualmente están en lados opuestos del universo observable - regiones que están tan distantes que actualmente están más allá de las esferas de influencia de cada una. Si para reducir a la mitad su separación tenemos que rodar la película cósmica más de la mitad hacia atrás, entonces, aunque las regiones del espacio estuvieran más cerca, la comunicación entre ellas era todavía imposible: estaban la mitad de lejos,

pero el tiempo transcurrido desde el estallido fue *menos de la mitad de* lo que es hoy en día, por lo que la luz sólo podía viajar *menos* de la mitad de lejos. Del mismo modo, si desde ese punto en la película tenemos que recorrer más de la mitad del camino de vuelta al principio para reducir a la mitad la separación entre las regiones una vez más, la comunicación se hace aún más difícil. Con este tipo de evolución cósmica, aunque las regiones estaban más cerca en el pasado, se vuelve más desconcertante -no menos- que de alguna manera se las arreglaran para igualar sus temperaturas. En relación a cuán lejos puede viajar la luz, las regiones se vuelven cada vez más aisladas a medida que las examinamos cada vez más atrás en el tiempo.

Esto es exactamente lo que sucede en la teoría estándar del big bang. En el big bang estándar, la gravedad actúa sólo como una fuerza de atracción, y por lo tanto, desde el principio, ha estado actuando para frenar la expansión del espacio. Ahora, si algo se está ralentizando, llevará más tiempo cubrir una distancia determinada. Por ejemplo, imaginemos que Secretariat dejó la puerta a un ritmo vertiginoso y cubrió la primera mitad de una carrera en dos minutos, pero como no es su mejor día, se ralentiza considerablemente durante la segunda mitad y tarda tres minutos más en terminar. Cuando se ve una película de la carrera en reversa, tendríamos que rodar la película más de la mitad para ver a Secretariat en la marca de la mitad del recorrido (tendríamos que rodar la película de cinco minutos de la carrera hasta la marca de dos minutos). De manera similar, ya que en la teoría estándar del big bang la gravedad ralentiza la expansión del espacio, desde cualquier punto de la película cósmica tenemos que retroceder más de la mitad del tiempo para reducir a la mitad la separación entre dos regiones. Y, como en el caso anterior, esto significa que aunque las regiones del espacio estaban más cerca en épocas anteriores, era más difícil -no menos- que se influyeran mutuamente y, por lo tanto, más desconcertante -no menos- que de alguna manera alcanzaran la misma temperatura.

Los físicos definen el horizonte *cósmico* de una región (o *el horizonte* para abreviar) como las regiones circundantes más distantes del espacio que están lo suficientemente cerca de la región dada para que ambas hayan intercambiado señales de luz en el tiempo transcurrido desde el estallido. La analogía es con las cosas más distantes que podemos ver en la superficie de la Tierra desde cualquier punto de vista particular.[15] El problema del horizonte, entonces, es el rompecabezas, inherente a las observaciones, de que las regiones cuyos horizontes siempre han estado separados -regiones que nunca podrían haber interactuado, comunicado o ejercido ningún tipo de influencia entre sí- tienen temperaturas casi idénticas.

El problema del horizonte no implica que el modelo estándar del big bang esté equivocado, pero pide a gritos una explicación. La cosmología inflacionaria proporciona una.

En la cosmología inflacionaria, hubo un breve instante en el que la gravedad era repulsiva y esto hizo que el espacio se expandiera cada vez más rápido. Durante esta parte de la película cósmica, habría que enrollar la película a *menos* de la mitad para reducir a la mitad la distancia entre dos regiones. Piense en una carrera en la que Secretariat cubre la primera mitad del recorrido en dos minutos y, como está teniendo la carrera de su vida, acelera y atraviesa la segunda mitad en un minuto. Sólo tendrías que poner la película de tres minutos de la carrera en la marca de dos minutos -menos de la mitad del recorrido- para verlo en la mitad del recorrido. Del mismo modo, la separación cada vez más rápida de dos regiones del espacio durante la expansión inflacionaria implica que para reducir a la mitad su separación es necesario enrollar la película cósmica menos *-mucho menos-* que a la mitad del principio. Por lo tanto, a medida que retrocedemos en el tiempo, se hace más *fácil que* dos regiones del espacio cualesquiera se influyan mutuamente, porque, proporcionalmente hablando, hay más tiempo para que se comuniquen. Los cálculos muestran que si la fase de expansión inflacionaria hizo que el espacio se expandiera por lo menos en un factor de 10 a ^{30}, una cantidad que se logra fácilmente en realizaciones específicas de expansión inflacionaria, todas las regiones del espacio que vemos actualmente -todas las regiones del espacio cuyas temperaturas hemos medido- fueron capaces de comunicarse tan fácilmente como la cocina y la sala de estar adyacentes y, por lo tanto, llegar eficientemente a una temperatura común en los primeros momentos del universo.[16] En resumen, el espacio se expande lo suficientemente lento al principio como para que se establezca ampliamente una temperatura uniforme y luego, a través de una intensa ráfaga de expansión cada vez más rápida, el universo compensa el lento comienzo y dispersa ampliamente las regiones cercanas.

Así es como la cosmología inflacionaria explica la misteriosa uniformidad de la radiación de fondo de microondas que inunda el espacio.

La inflación y el problema de la planicie

Un segundo problema abordado por la cosmología inflacionaria tiene que ver con la forma del espacio. En el capítulo 8, impusimos el criterio de la simetría espacial uniforme y encontramos tres formas en las que el tejido del espacio puede curvarse. Recurriendo a nuestras visualizaciones bidimensionales, las posibilidades son la curvatura positiva (en forma de superficie de una pelota), la curvatura negativa (en forma de silla de montar), y la curvatura cero (en forma de un tablero plano infinito o de una pantalla de videojuegos de tamaño finito). Desde los primeros días de la relatividad general, los físicos se han dado cuenta de que la materia y la energía totales en cada volumen del espacio -la densidad de *materia/energía-* determinan la curvatura del espacio. Si la densidad de materia/energía es alta, el espacio retrocederá sobre sí mismo en forma de esfera; es decir, habrá una curvatura positiva. Si la densidad de materia/energía es baja,

el espacio se encandilará hacia afuera como una silla de montar; es decir, habrá una curvatura negativa. O, como se mencionó en el último capítulo, para una cantidad muy especial de densidad de materia/energía -la densidad crítica, igual a la masa de unos cinco átomos de hidrógeno (unos $10^{-23 \text{ gramos}}$) en cada metro cúbico- el espacio se encontrará justo entre estos dos extremos, y será perfectamente plano: es decir, no habrá curvatura.

Ahora para el rompecabezas.

Las ecuaciones de la relatividad general, que subyacen en el modelo estándar del big bang, muestran que si la densidad de materia/energía al principio era *exactamente igual* a la densidad crítica, entonces permanecería igual a la densidad crítica a medida que el espacio se expandiera. [17] Pero si la densidad de materia/energía era incluso ligeramente superior o inferior a la densidad crítica, la expansión posterior la alejaría enormemente de la densidad crítica. Sólo para tener una idea de los números, si en un segundo el ATB, el universo estuviera a un paso de la criticidad, teniendo el 99,99 por ciento de la densidad crítica, los cálculos muestran que para hoy su densidad habría sido conducida hasta el 0,00000000001 de la densidad crítica. Es algo así como la situación que enfrenta un escalador de montaña que camina a través de una saliente muy delgada con una caída empinada a cada lado. Si su paso está justo en la marca, logrará cruzar. Pero incluso un pequeño paso en falso que esté demasiado a la izquierda o a la derecha se amplificará en un resultado significativamente diferente. (Y, a riesgo de tener demasiadas analogías, esta característica del modelo estándar del big bang también me recuerda a la ducha de hace años en mi dormitorio de la universidad: si lograbas ajustar la perilla perfectamente, podías obtener una temperatura de agua cómoda. Pero si te desviabas por lo más mínimo, de una forma u otra, el agua se quemaba o se congelaba. Algunos estudiantes dejaron de ducharse por completo).

Durante décadas, los físicos han intentado medir la densidad de materia/energía en el universo. En la década de 1980, aunque las mediciones estaban lejos de ser completas, una cosa era cierta: la densidad de materia/energía del universo no es miles y miles de veces más pequeña o más grande que la densidad crítica; equivalentemente, el espacio no está sustancialmente curvado, ni positiva ni negativamente. Esta comprensión arrojó una luz incómoda sobre el modelo estándar del big bang. Implicaba que para que el big bang estándar fuera coherente con las observaciones, algún mecanismo -que nadie podía explicar o identificar- debía haber ajustado la densidad de materia/energía del universo temprano *extraordinariamente* cerca de la densidad crítica. Por ejemplo, los cálculos mostraron que en un segundo ATB, la densidad de materia/energía del universo tenía que haber estado dentro de una millonésima de una *millonésima de porcentaje de* la densidad crítica; si la densidad de materia/energía se desviaba del valor crítico en una cantidad mayor que esta minúscula, el modelo estándar del big bang predice una densidad de materia/energía hoy en día que es

enormemente diferente de la que observamos. Según el modelo estándar del big bang, entonces, el universo primitivo, como el escalador de montaña, se tambaleaba a lo largo de un saliente extremadamente estrecho. Una pequeña desviación en las condiciones de hace miles de millones de años habría llevado a un universo actual muy diferente del revelado por las mediciones de los astrónomos. Esto se conoce como el *problema de la planicie.*

Aunque hemos cubierto la idea esencial, es importante entender el sentido en el que el problema de la planicie es un problema. El problema de la planicie no demuestra de ninguna manera que el modelo estándar del big bang esté equivocado. Un creyente incondicional reacciona al problema de la planicie encogiéndose de hombros y la respuesta brusca "Así era entonces", tomando la densidad de materia/energía finamente ajustada del universo primitivo, que el big bang estándar requiere para producir predicciones que estén en el mismo rango que las observaciones, como un dato inexplicable. Pero esta respuesta hace que la mayoría de los físicos retrocedan. Los físicos creen que una teoría es totalmente antinatural si su éxito depende de un ajuste extremadamente preciso de las características para las que carecemos de una explicación fundamental. Sin dar una razón de por qué la densidad de materia/energía del universo temprano habría sido tan finamente afinada a un valor aceptable, muchos físicos han encontrado que el modelo estándar del big bang es muy artificial. Por lo tanto, el problema de la planicie resalta la extrema sensibilidad del modelo estándar del big bang a las condiciones del pasado remoto del que sabemos muy poco; muestra cómo la teoría debe asumir que el universo era *justo así,* para poder funcionar.

Por el contrario, los físicos anhelan teorías cuyas predicciones sean insensibles a cantidades desconocidas, como por ejemplo cómo eran las cosas hace mucho tiempo. Tales teorías se sienten robustas y naturales porque sus predicciones no dependen delicadamente de detalles que son difíciles, o tal vez incluso imposibles, de determinar directamente. Este es el tipo de teoría proporcionada por la cosmología inflacionaria, y su solución al problema de la planicie ilustra el porqué.

La observación esencial es que mientras que la gravedad atractiva amplifica cualquier desviación de la densidad crítica de materia/energía, la gravedad repulsiva de la teoría inflacionista hace lo contrario: *reduce cualquier desviación* de la densidad crítica. Para tener una idea de por qué esto es así, es más fácil utilizar la estrecha conexión entre la densidad de materia/energía del universo y su curvatura para razonar geométricamente. En particular, observe que incluso si la forma del universo se curvó significativamente al principio, después de la expansión inflacionaria una porción de espacio lo suficientemente grande para abarcar el universo observable de hoy en día se ve casi plana. Esta es una característica de la geometría de la que todos somos muy conscientes: La superficie de una pelota de baloncesto es obviamente curvada, pero llevó tiempo y a los pensadores con descaro antes de que todos se convencieran de que la superficie de la Tierra también era curvada. La razón es que, en igualdad de

condiciones, cuanto más grande es algo, más gradualmente se curva y más plano aparece un parche de un tamaño determinado en su superficie. Si cubriéramos el estado de Nebraska sobre una esfera de unos pocos cientos de kilómetros de diámetro, como en la figura 10.4a, se vería curvada, pero en la superficie de la Tierra, como casi todos los nebrasqueños coinciden, se ve plana. Si pusiéramos a Nebraska sobre una esfera mil millones de veces más grande que la Tierra, se vería aún más plana. En la cosmología inflacionaria, el espacio fue estirado por un factor tan colosal que el universo observable, la parte que podemos ver, no es más que un pequeño parche en un cosmos gigantesco. Y así, como Nebraska se extiende en una esfera gigante como en la figura 10.4d, incluso si todo el universo fuera curvo, el universo *observable sería* casi plano. [18]

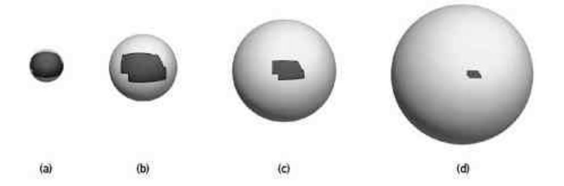


Figura 10.4 Una forma de tamaño fijo, como la del estado de Nebraska, aparece cada vez más plana cuando se dispone en esferas cada vez más grandes. En esta analogía, la esfera representa el universo entero, mientras que Nebraska representa el universo *observable,* la parte dentro de nuestro horizonte cósmico.

Es como si hubiera poderosos imanes de orientación opuesta incrustados en las botas del alpinista y en la delgada cornisa que está cruzando. Incluso si su paso está apuntando un poco fuera de la marca, la fuerte atracción entre los imanes asegura que su pie aterrice directamente en la cornisa. De manera similar, incluso si el universo temprano se desvió un poco de la densidad crítica de materia/energía y por lo tanto estaba lejos de ser plano, la expansión inflacionaria aseguró que la parte del espacio a la que tenemos acceso fuera *conducida* hacia una forma plana y que la densidad de materia/energía a la que tenemos acceso fuera *conducida* hacia el valor crítico.

y predicción

La visión de la cosmología inflacionaria en el horizonte y los problemas de la planicie representan un tremendo progreso. Para que la evolución cosmológica produzca un universo homogéneo cuya densidad de materia/energía esté incluso remotamente cerca de lo que observamos hoy en día, el modelo estándar del big bang requiere un ajuste preciso, inexplicable y casi inquietante de las condiciones desde el principio. Este ajuste puede ser asumido, como defiende el incondicional seguidor del big bang estándar, pero la falta de una explicación hace que la teoría parezca artificial. Por el contrario, independientemente de las propiedades

detalladas de la densidad de materia/energía del universo primitivo, la evolución cosmológica inflacionaria *predice* que la parte que podemos ver debería ser muy casi plana; es decir, *predice* que la densidad de materia/energía que observamos debería ser muy cercana al 100 por ciento de la densidad crítica.

La insensibilidad a las propiedades detalladas del universo primitivo es una característica maravillosa de la teoría inflacionaria, porque permite predicciones definitivas independientemente de nuestra ignorancia de las condiciones hace mucho tiempo. Pero ahora debemos preguntarnos: ¿Cómo resisten estas predicciones a observaciones detalladas y precisas? ¿Apoyan los datos la predicción de la cosmología inflacionaria de que debemos observar un universo plano que contiene la densidad crítica de materia/energía?

Durante muchos años la respuesta parecía ser "No del todo". Numerosos estudios astronómicos midieron cuidadosamente la cantidad de materia/energía que se podía ver en el cosmos, y la respuesta que obtuvieron fue alrededor del 5 por ciento de la densidad crítica. Esto está lejos de las enormes o minúsculas densidades a las que el big bang estándar conduce naturalmente - sin ajustes artificiales - y es a lo que aludí antes cuando dije que las observaciones establecen que la densidad de materia/energía del universo no es miles y miles de veces mayor o menor que la cantidad crítica. Aún así, el 5 por ciento no llega al 100 por ciento que predice la inflación. Pero los físicos se han dado cuenta hace tiempo de que hay que tener cuidado al evaluar los datos. Los estudios astronómicos que suman un 5% sólo tienen en cuenta la materia y la energía que emiten luz y que, por lo tanto, pueden verse con los telescopios de los astrónomos. Y durante décadas, incluso antes del descubrimiento de la cosmología inflacionaria, había cada vez más pruebas de que el universo tiene un fuerte lado oscuro.

Una predicción de la oscuridad

A principios de la década de 1930, Fritz Zwicky, profesor de astronomía del Instituto Tecnológico de California (un famoso científico cáustico cuya apreciación de la simetría le llevó a llamar a sus colegas bastardos esféricos porque, según explicó, eran bastardos de cualquier manera que se les mirara [19]), se dio cuenta de que las galaxias periféricas del cúmulo Coma, un conjunto de miles de galaxias a unos 370 millones de años-luz de la Tierra, se movían demasiado rápido para que su materia visible reuniera una fuerza gravitatoria adecuada para mantenerlas atadas al grupo. En cambio, su análisis mostró que muchas de las galaxias de movimiento más rápido deberían ser arrojadas fuera del cúmulo, como gotitas de agua lanzadas por un neumático de bicicleta que gira. Y sin embargo, ninguna lo fue. Zwicky conjeturó que podría haber materia adicional permeando el cúmulo que no emitiera luz pero que proporcionara la atracción gravitacional adicional

necesaria para mantener el cúmulo unido. Sus cálculos mostraron que si esta explicación era correcta, la gran mayoría de la masa del cúmulo comprendería este material no luminoso. En 1936, Sinclair Smith, del observatorio de Mount Wilson, que estudiaba el cúmulo de Virgo, encontró pruebas que lo corroboraban y llegó a una conclusión similar. Pero como las observaciones de ambos hombres, así como otras subsiguientes, tenían varias incertidumbres, muchos seguían sin estar convencidos de que hubiera materia voluminosa no vista cuya atracción gravitatoria mantenía a los grupos de galaxias juntos.

Durante los siguientes treinta años la evidencia de observación de la materia no luminosa continuó creciendo, [20] pero fue el trabajo de la astrónoma Vera Rubin de la Institución Carnegie de Washington, junto con Kent Ford y otros, lo que realmente cerró el caso. Rubin y sus colaboradores estudiaron los movimientos de las estrellas dentro de numerosas galaxias giratorias y concluyeron que si lo que ves es lo que hay, entonces muchas de las estrellas de la galaxia deberían ser lanzadas rutinariamente hacia afuera. Sus observaciones mostraron de manera concluyente que la materia galáctica visible no podía ejercer un agarre gravitacional ni de cerca lo suficientemente fuerte como para impedir que las estrellas de más rápido movimiento se liberaran. Sin embargo, sus detallados análisis también mostraron que las estrellas *permanecerían atadas gravitacionalmente* si las galaxias que habitaban estuvieran inmersas en una bola gigante de materia no luminosa (como en la figura 10.5), cuya masa total superaba con creces la del material luminoso de la galaxia. Y así, como una audiencia que infiere la presencia de un mimo de túnica oscura aunque sólo vea sus manos de guante blanco revoloteando de un lado a otro en el escenario no iluminado, los astrónomos concluyeron que el universo debe estar impregnado de materia oscura*, es decir,* materia que no se agrupa en las estrellas y, por lo tanto, no emite luz, y que, por lo tanto, ejerce una atracción gravitatoria sin revelarse visiblemente. Los componentes luminosos del universo -las estrellas- se revelaron como simples faros flotantes en un océano gigante de materia oscura.

Pero si la materia oscura debe existir para producir los movimientos observados de las estrellas y galaxias, ¿de qué está hecha? Hasta ahora, nadie lo sabe. La identidad de la materia oscura sigue siendo un misterio importante y amenazador, aunque los astrónomos y físicos han sugerido numerosos constituyentes posibles que van desde varios tipos de partículas exóticas hasta un baño cósmico de agujeros negros en miniatura. Pero incluso sin determinar su composición, al analizar de cerca sus efectos gravitatorios los astrónomos han podido determinar con significativa precisión cuánta materia oscura se extiende por todo el universo. Y la respuesta que han encontrado asciende a alrededor del 25 por ciento de la densidad crítica.[21] Así, junto con el 5 por ciento encontrado en la materia visible, la materia oscura eleva nuestra cuenta al 30 por ciento de la cantidad predicha por la cosmología inflacionaria.

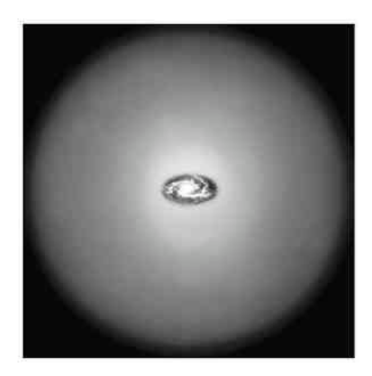


Figura 10.5 Una galaxia inmersa en una bola de materia oscura (con la materia oscura resaltada artificialmente para hacerla visible en la figura).

Bueno, esto es ciertamente un progreso, pero durante mucho tiempo los científicos se rascaron la cabeza, preguntándose cómo explicar el 70 por ciento restante del universo, que, si la cosmología inflacionaria era correcta, aparentemente había desaparecido. Pero entonces, en 1998, dos grupos de astrónomos llegaron a la misma impactante conclusión, lo que da un giro completo a nuestra historia y revela una vez más la presciencia de Albert Einstein.

El universo fugitivo

Así como se puede buscar una segunda opinión para corroborar un diagnóstico médico, los físicos también buscan segundas opiniones cuando encuentran datos o teorías que apuntan a resultados desconcertantes. De estas segundas opiniones, las más convincentes son las que llegan a la misma conclusión desde un punto de vista que difiere marcadamente del análisis original. Cuando las flechas de la explicación convergen en un punto desde diferentes ángulos, es muy probable que apunten al blanco científico. Naturalmente entonces, con la cosmología inflacionaria sugiriendo fuertemente algo totalmente extraño - que el 70 por ciento de la masa/energía del universo aún no ha sido medida o identificada - los físicos han anhelado una confirmación independiente. Hace tiempo que se ha comprendido que la medición del parámetro de *desaceleración* serviría.

Desde justo después del estallido inflacionario inicial, la gravedad atractiva ordinaria ha estado frenando la expansión del espacio. La velocidad a la que se produce esta desaceleración se llama el parámetro de desaceleración. Una medición precisa del parámetro proporcionaría una visión independiente de la cantidad total de materia en el universo: más materia, emita o no luz, implica una mayor atracción gravitatoria y por lo tanto una desaceleración más pronunciada de la expansión espacial.

Durante muchas décadas, los astrónomos han tratado de medir la desaceleración del universo, pero aunque hacerlo es sencillo en principio, es un desafío en la práctica. Cuando observamos cuerpos celestes distantes como galaxias o cuásares, los vemos como eran hace mucho tiempo: cuanto más lejos están, más atrás en el tiempo estamos mirando. Así que, si pudiéramos medir la velocidad con la que se alejan de nosotros, tendríamos una medida de la velocidad con la que el universo se expande en el pasado lejano. Además, si pudiéramos llevar a cabo tales mediciones para objetos astronómicos situados a una variedad de distancias, habríamos medido la tasa de expansión del universo en una variedad de momentos en el pasado. Comparando estas tasas de expansión, podríamos determinar cómo la expansión del espacio se está ralentizando en el tiempo y así determinar el parámetro de desaceleración.

Llevar a cabo esta estrategia para medir el parámetro de desaceleración requiere, por lo tanto, dos cosas: un medio para determinar la distancia de un objeto astronómico dado (para que sepamos cuán atrás en el tiempo estamos mirando) y un medio para determinar la velocidad con la que el objeto se aleja de nosotros (para que conozcamos la tasa de expansión espacial en ese momento en el pasado). Este último ingrediente es más fácil de conseguir. Así como el tono de la sirena de un coche de policía baja a tonos más bajos cuando se aleja de nosotros, la frecuencia de vibración de la luz emitida por una fuente astronómica también baja cuando el objeto se aleja. Y como la luz emitida por átomos como el hidrógeno, el helio y el oxígeno -átomos que están entre los constituyentes de las estrellas, cuásares y galaxias- ha sido cuidadosamente estudiada en condiciones de laboratorio, se puede hacer una determinación precisa de la velocidad del objeto examinando cómo la luz que recibimos difiere de la que se ve en el laboratorio.

Pero el primer ingrediente, un método para determinar con precisión cuán lejos está un objeto, ha demostrado ser el dolor de cabeza del astrónomo. Cuanto más lejos está algo, más se espera que aparezca, pero convertir esta simple observación en una medida cuantitativa es difícil. Para juzgar la distancia a un objeto por su brillo aparente, necesitas saber su brillo intrínseco, cuán brillante sería si estuviera a tu lado. Y es difícil determinar el brillo intrínseco de un objeto a miles de millones de años luz de distancia. La estrategia general es buscar una especie de cuerpos celestes que, por razones fundamentales de la astrofísica, siempre ardan con un brillo estándar y fiable. Si el espacio estuviera salpicado de bombillas brillantes de 100 vatios, eso serviría, ya que podríamos determinar fácilmente la distancia de una determinada bombilla en función de lo tenue que parezca (aunque sería un desafío ver bombillas de 100 vatios desde una distancia considerable). Pero, como el espacio no está tan dotado, ¿qué puede jugar el papel de las bombillas de brillo estándar, o, en términos de astronomía, qué puede jugar el papel de las *velas estándar*? A través de los años los astrónomos han estudiado una variedad de posibilidades, pero el candidato más exitoso hasta la fecha es una clase particular de explosiones de supernovas.

Cuando las estrellas agotan su combustible nuclear, la presión exterior de la fusión nuclear en el núcleo de la estrella disminuye y la estrella comienza a implosionar por su propio peso. A medida que el núcleo de la estrella se estrella sobre sí mismo, su temperatura aumenta rápidamente, a veces resultando en una enorme explosión que vuela las capas externas de la estrella en un brillante despliegue de fuegos artificiales celestiales. Tal explosión se conoce como supernova; durante un período de semanas, una sola estrella en explosión puede arder tan brillante como mil millones de soles. Es realmente alucinante: ¡una sola estrella ardiendo tan brillante como casi toda una galaxia! Diferentes tipos de estrellas, de diferentes tamaños, con diferentes abundancias atómicas, etc., dan lugar a diferentes tipos de explosiones de supernovas, pero durante muchos años los astrónomos se han dado cuenta de que ciertas explosiones de supernovas siempre parecen arder con el mismo brillo intrínseco. Estas son las explosiones de supernovas de *tipo Ia*.

En una supernova de tipo Ia, una estrella enana blanca -una estrella que ha agotado su suministro de combustible nuclear pero que no tiene suficiente masa para encender una explosión de supernova por sí misma- chupa el material de la superficie de una estrella compañera cercana. Cuando la masa de la estrella enana alcanza un valor crítico particular, alrededor de 1,4 veces la del sol, sufre una reacción nuclear desbocada que causa que la estrella se convierta en supernova. Dado que tales explosiones de supernovas ocurren cuando la estrella enana alcanza la misma masa crítica, las características de la explosión, incluido su brillo intrínseco general, son en gran medida las mismas de un episodio a otro. Además, como las supernovas, a diferencia de las bombillas de 100 vatios, son tan fantásticamente poderosas, no sólo tienen un brillo estándar y fiable, sino que también se pueden ver claramente en todo el universo. Por lo tanto, son los principales candidatos para las velas estándar. [22]

En la década de 1990, dos grupos de astrónomos, uno dirigido por Saul Perlmutter en el Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley, y el otro dirigido por Brian Schmidt en la Universidad Nacional Australiana, se propusieron determinar la desaceleración -y por lo tanto la masa/energía total- del universo midiendo las velocidades de recesión de las supernovas de tipo Ia. Identificar una supernova como del tipo Ia es bastante sencillo porque la luz que generan sus explosiones sigue un patrón distintivo de intensidad que sube abruptamente y luego baja gradualmente. Pero atrapar una supernova de tipo Ia en el acto no es una hazaña pequeña, ya que sólo ocurren una vez cada pocos cientos de años en una galaxia típica. No obstante, gracias a la innovadora técnica de observar simultáneamente miles de galaxias con telescopios de amplio campo de visión, los equipos pudieron encontrar casi cuatro docenas de supernovas de tipo Ia a varias distancias de la Tierra. Tras determinar minuciosamente la distancia y las velocidades de recesión de cada una, ambos grupos llegaron a una conclusión totalmente inesperada: desde que el universo tenía unos 7.000 millones de años de edad, su tasa de expansión *no* ha disminuido. En cambio, la tasa de expansión se ha estado acelerando.

Los grupos llegaron a la conclusión de que la expansión del universo se ralentizó durante los primeros 7.000 millones de años después del estallido inicial hacia el exterior, de forma muy parecida a como un coche frena al acercarse a una cabina de peaje de una autopista. Esto fue lo que se esperaba. Pero los datos revelaron que, al igual que un conductor que pisa el acelerador después de deslizarse por el carril EZ-Pass, la expansión del universo se ha acelerado desde entonces. La tasa de expansión del espacio 7 mil millones de años ATB fue *menor* que la tasa de expansión 8 mil millones de años ATB, que fue *menor que la tasa de* expansión 9 mil millones de años ATB, y así sucesivamente, todas las cuales son *menores* que la tasa de expansión actual. La esperada desaceleración de la expansión espacial ha resultado ser una *aceleración* inesperada .

¿Pero cómo puede ser esto? Bueno, la respuesta proporciona la segunda opinión que corrobora la falta del 70 por ciento de masa/energía que los físicos habían estado buscando.

El 70 por ciento de los desaparecidos

Si retrocedemos a 1917 y a la introducción por parte de Einstein de una constante cosmológica, tenemos suficiente información para sugerir cómo puede ser que el universo se esté acelerando. La materia y la energía ordinarias dan lugar a la gravedad atractiva ordinaria, que frena la expansión espacial. Pero a medida que el universo se expande y las cosas se extienden cada vez más, esta atracción gravitatoria cósmica, aunque sigue actuando para frenar la expansión, se debilita. Y esto nos prepara para el nuevo e inesperado giro. Si el universo tuviera una constante cosmológica, y si su magnitud tuviera el valor correcto y pequeño, hasta unos 7.000 millones de años ATB su repulsión gravitatoria habría sido abrumada por la atracción gravitatoria habitual de la materia ordinaria, produciendo una ralentización neta de la expansión, de acuerdo con los datos. Pero entonces, a medida que la materia ordinaria se extendía y su atracción gravitatoria disminuía, el empuje repulsivo de la constante cosmológica (cuya fuerza no cambia a medida que la materia se extiende) habría ido ganando terreno gradualmente, y *la era de expansión espacial desacelerada habría dado paso a una nueva era de expansión acelerada.*

A finales de la década de 1990, tal razonamiento y un análisis profundo de los datos llevaron tanto al grupo de Perlmutter como al de Schmidt a sugerir que Einstein no se había equivocado unas ocho décadas antes cuando introdujo una constante cosmológica en las ecuaciones gravitatorias. El universo, sugirieron, tiene una constante cosmológica. [23] Su magnitud no es lo que Einstein propuso, ya que estaba persiguiendo un universo estático en el que la atracción y la repulsión gravitatorias coincidían de forma precisa, y estos investigadores descubrieron que durante miles de millones de años la repulsión ha dominado. Pero a pesar de ese

detalle, si el descubrimiento de estos grupos sigue siendo válido bajo el estrecho escrutinio y los estudios de seguimiento que se están llevando a cabo actualmente, Einstein habrá visto una vez más una característica fundamental del universo, que esta vez tardó más de ochenta años en confirmarse experimentalmente.

La velocidad de recesión de una supernova depende de la diferencia entre la atracción gravitatoria de la materia ordinaria y el empuje gravitatorio de la "energía oscura" suministrada por la constante cosmológica. Tomando la cantidad de materia, tanto visible como oscura, como alrededor del 30 por ciento de la densidad crítica, los investigadores de la supernova concluyeron que la expansión acelerada que habían observado requería un empuje hacia afuera de una constante cosmológica cuya energía oscura contribuye alrededor del 70 por ciento de la densidad crítica.

Este es un número notable. Si es correcto, entonces no sólo la materia ordinaria -protones, neutrones, electrones- constituye un mísero 5 por ciento de la masa/energía del universo, y no sólo alguna forma actualmente no identificada de materia oscura constituye al menos *cinco veces* esa cantidad, sino que también la *mayoría* de la masa/energía del universo es aportada por una forma totalmente diferente y bastante misteriosa de energía oscura que se extiende por todo el espacio. Si estas ideas son correctas, extienden dramáticamente la revolución copernicana: no sólo no somos el centro del universo, sino que la materia de la que estamos hechos es como restos flotantes en el océano cósmico. Si los protones, neutrones y electrones hubieran sido dejados fuera del gran diseño, la masa/energía total del universo difícilmente habría disminuido.

Pero hay una segunda razón, igualmente importante, por la que el 70 por ciento es un número notable. Una constante cosmológica que contribuya con el 70 por ciento de la densidad crítica, junto con el 30 por ciento procedente de la materia ordinaria y la materia oscura, llevaría la masa/energía total del universo hasta el 100 por ciento completo predicho por la cosmología inflacionaria! Por lo tanto, el empuje hacia afuera demostrado por los datos de las supernovas puede ser explicado por la cantidad justa de energía oscura para explicar el invisible 70% del universo que los cosmólogos inflacionarios se han estado rascando la cabeza. Las mediciones de las supernovas y la cosmología inflacionaria son maravillosamente complementarias. Se confirman mutuamente. Cada una proporciona una segunda opinión que corrobora la otra.[24]

Combinando los resultados de la observación de las supernovas con las ideas teóricas de la inflación, llegamos así al siguiente esbozo de la evolución cósmica, resumido en la figura 10.6. Al principio, la energía del universo era transportada por el campo de inflado, que estaba encaramado lejos de su estado de energía mínima. Debido a su presión negativa, el campo de inflado impulsó una enorme explosión de expansión inflacionaria. Luego, unos 10 $^{a\ 35}$ segundos más tarde,

cuando el campo de inflado se deslizó por su potencial tazón de energía, la ráfaga de expansión llegó a su fin y el inflado liberó su energía acumulada para la producción de materia ordinaria y radiación. Durante muchos miles de millones de años, estos familiares constituyentes del universo ejercieron una atracción gravitatoria ordinaria que ralentizó la expansión espacial. Pero a medida que el universo crecía y se adelgazaba, la atracción gravitatoria disminuía. Hace unos 7.000 millones de años, la atracción gravitatoria ordinaria se debilitó lo suficiente como para que la repulsión gravitatoria de la constante cosmológica del universo se hiciera dominante, y desde entonces la tasa de expansión espacial ha estado aumentando continuamente.

Dentro de unos 100.000 millones de años, todas las galaxias, excepto las más cercanas, serán arrastradas por el espacio en expansión a una velocidad superior a la de la luz, por lo que nos será imposible verlas, independientemente de la potencia de los telescopios utilizados. Si estas ideas son correctas, entonces en el futuro lejano el universo será un lugar vasto, vacío y solitario.

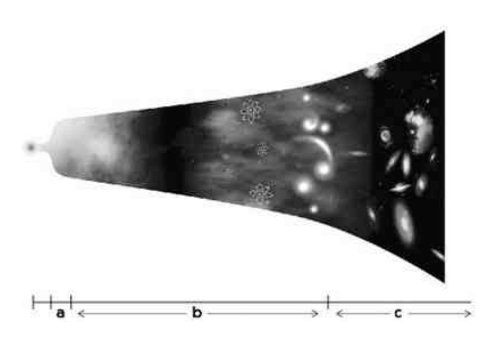


Figura 10.6 Una línea de tiempo de la evolución cósmica. **Estallido inflacionario**. estándar del Big Bang. Era de expansión acelerada.

Rompecabezas y progreso

Con estos descubrimientos, parecía evidente que las piezas del rompecabezas cosmológico estaban cayendo en su lugar. Preguntas dejadas sin respuesta por la teoría estándar del big bang... ¿Qué encendió la hinchazón exterior del espacio? ¿Por qué la temperatura de la radiación de fondo de microondas es tan uniforme? ¿Por qué el espacio parece tener una forma plana? fueron abordadas por la teoría inflacionaria. Aún así, los temas espinosos sobre los orígenes fundamentales han seguido aumentando: ¿Hubo una época antes del estallido inflacionario, y si fue así, cómo fue? ¿Qué introdujo un campo de inflado desplazado de su configuración de menor energía para iniciar la expansión inflacionaria? Y, la pregunta más reciente de todas, ¿por qué el universo está aparentemente compuesto de tal mezcla de ingredientes: 5 por ciento de materia familiar, 25 por ciento de materia oscura, 70 por ciento de energía oscura? A pesar del hecho inmensamente agradable de que esta receta cósmica está de acuerdo con la predicción de la inflación de que el universo debería tener el 100 por ciento de la densidad crítica, y aunque explica simultáneamente la expansión acelerada encontrada por los estudios de supernovas, muchos físicos ven la composición de la mezcolanza como claramente poco atractiva. ¿Por qué, muchos se han preguntado, ha resultado ser tan complicada la composición del universo? ¿Por qué hay un puñado de ingredientes dispares en tan aparentemente aleatorias abundancias? ¿Hay algún plan subyacente sensato que los estudios teóricos aún no han revelado?

Nadie ha avanzado ninguna respuesta convincente a estas preguntas; se encuentran entre los problemas de investigación apremiantes que impulsan la investigación cosmológica actual y sirven para recordarnos los muchos nudos enmarañados que aún debemos desentrañar antes de poder afirmar que hemos comprendido plenamente el nacimiento del universo. Pero a pesar de los importantes desafíos que quedan, la inflación es, de lejos, la teoría cosmológica más importante. Para estar seguros, la creencia de los físicos en la inflación se basa en los logros que hemos discutido hasta ahora. Pero la confianza en la cosmología inflacionaria tiene raíces aún más profundas. Como veremos en el próximo capítulo, una serie de otras consideraciones, procedentes tanto de descubrimientos observacionales como teóricos, han convencido a muchos físicos que trabajan en este campo de que el marco inflacionario es la contribución más importante y duradera de nuestra generación a la ciencia cosmológica.

11 - Quanta en el cielo con diamantes

LA INFLACIÓN, LOS NERVIOS CUÁNTICOS Y LA FLECHA DEL TIEMPO

El descubrimiento del marco inflacionario inició una nueva era en la investigación cosmológica, y en las décadas posteriores se han escrito muchos miles de artículos sobre el tema. Los científicos han explorado casi cada rincón de la teoría que se pueda imaginar. Mientras que muchos de estos trabajos se han centrado en detalles de importancia técnica, otros han ido más allá y han mostrado cómo la inflación no sólo resuelve problemas cosmológicos específicos más allá del alcance del big bang estándar, sino que también proporciona nuevos y poderosos enfoques a una serie de cuestiones antiguas. De éstos, hay tres desarrollos - que tienen que ver con la formación de estructuras grumosas como las galaxias; la cantidad de energía requerida para generar el universo que vemos; y (de primordial importancia para nuestra historia) el origen de la flecha del tiempo - en la cual la inflación ha dado lugar a un progreso sustancial y, algunos dirían, espectacular.

Echemos un vistazo.

Escritura cuántica del cielo

La solución de la cosmología inflacionaria a los problemas del horizonte y la planicie fue su reclamo inicial a la fama, y con razón. Como hemos visto, estos fueron grandes logros. Pero en los años posteriores, muchos físicos han llegado a creer que otro de los logros de la inflación comparte el primer lugar en la lista de las contribuciones más importantes de la teoría.

La aclamada perspicacia se refiere a un tema que, hasta ahora, les he animado a no pensar: ¿Cómo es que hay galaxias, estrellas, planetas y otras cosas grumosas en el universo? En los últimos tres capítulos, les pedí que se centraran en las grandes escalas astronómicas - escalas en las que el universo parece homogéneo, escalas tan grandes que se puede pensar en galaxias enteras como una sola molécula de H_2O, mientras que el universo en sí mismo es el entero y uniforme vaso de agua. Pero tarde o temprano la cosmología tiene que enfrentarse con el hecho de que cuando se examina el cosmos a escalas "más finas" se descubren estructuras grumosas como las galaxias. Y aquí, una vez más, nos enfrentamos a un rompecabezas.

Si el universo es realmente liso, uniforme y homogéneo a gran escala - características que se apoyan en la observación y que están en el corazón de todos los análisis cosmológicos- ¿de dónde podría haber venido el bulto a menor escala? El firme creyente en la cosmología del big bang estándar puede, una vez más, ignorar esta pregunta apelando a las condiciones altamente favorables y misteriosamente afinadas del universo temprano: "Cerca del principio", tal creyente puede decir, "las cosas eran, en general, suaves y uniformes, pero no *perfectamente uniformes*. No puedo decir cómo las condiciones llegaron a ser así. Así es como era en ese entonces. Con el tiempo, este pequeño bulto creció, ya que un bulto tiene una mayor atracción gravitacional, siendo más denso que sus alrededores, y por lo tanto se agarra a más material cercano, creciendo aún más. Al final, los bultos se hicieron lo suficientemente grandes como para formar estrellas y galaxias". Esta sería una historia convincente si no fuera por dos deficiencias: la total falta de explicación de la homogeneidad general inicial o estas importantes y diminutas no uniformidades. Ahí es donde la cosmología inflacionaria proporciona un progreso gratificante. Ya hemos visto que la inflación ofrece una explicación para la uniformidad a gran escala, y como ahora aprenderemos, el poder explicativo de la teoría va aún más allá. De acuerdo con la cosmología inflacionaria, la no uniformidad inicial que finalmente resultó en la formación de estrellas y galaxias vino de la mecánica cuántica.

Esta magnífica idea surge de la interacción entre dos áreas de la física aparentemente dispares: la expansión inflacionaria del espacio y el principio de incertidumbre cuántica. El principio de incertidumbre nos dice que siempre hay compensaciones en cuanto a cuán agudamente pueden determinarse varios rasgos físicos complementarios en el cosmos. El ejemplo más familiar (véase el capítulo 4) se refiere a la materia: cuanto más exactamente se determina la posición de una partícula, menos precisamente se puede determinar su velocidad. Pero el principio de incertidumbre también se aplica a los campos. Por el mismo razonamiento que utilizamos esencialmente en su aplicación a las partículas, el principio de incertidumbre implica que cuanto más precisamente se determine el valor de un campo en un lugar del espacio, menos precisamente podrá determinarse su velocidad de cambio en ese lugar. (La posición de una partícula y la velocidad de cambio de su posición -su velocidad- desempeñan papeles

análogos en la mecánica cuántica al valor de un campo y a la velocidad de cambio del valor del campo, en un lugar determinado del espacio).

Me gusta resumir el principio de incertidumbre diciendo, a grandes rasgos, que la mecánica cuántica hace que las cosas se pongan nerviosas y turbulentas. Si la velocidad de una partícula no puede ser delineada con total precisión, tampoco podemos delinear dónde se ubicará la partícula ni siquiera una fracción de segundo más tarde, ya que la velocidad *ahora* determina la posición *entonces.* En cierto sentido, la partícula es libre de asumir tal o cual velocidad, o más precisamente, de asumir una mezcla de muchas velocidades diferentes, y por lo tanto se moverá frenéticamente, yendo al azar de un lado a otro. Para los campos, la situación es similar. Si la velocidad de cambio de un campo no puede ser delineada con total precisión, entonces tampoco podemos delinear cuál será el valor del campo, en cualquier lugar, incluso un momento después. En cierto sentido, el campo se ondulará hacia arriba o hacia abajo a tal o cual velocidad, o, más precisamente, asumirá una extraña mezcla de muchas tasas de cambio diferentes, y por lo tanto su valor sufrirá un frenético, borroso y aleatorio temblor.

En la vida diaria no somos directamente conscientes de los nervios, ni para las partículas ni para los campos, porque tienen lugar en escalas subatómicas. Pero ahí es donde la inflación tiene un gran impacto. El repentino estallido de la expansión inflacionaria estiró el espacio por un factor tan enorme que lo que inicialmente habitaba en lo microscópico fue arrastrado a lo macroscópico. Como ejemplo clave, los pioneros [1] de la cosmología inflacionaria se dieron cuenta de que las diferencias aleatorias entre los nervios cuánticos en una ubicación espacial y otra habrían generado ligeras inhomogeneidades en el ámbito microscópico; debido a la agitación cuántica indiscriminada, la cantidad de energía en una ubicación habría sido un poco diferente de la que había en otra. Entonces, a través de la subsiguiente hinchazón inflacionaria del espacio, estas diminutas variaciones se habrían estirado hasta escalas mucho más grandes que el dominio cuántico, produciendo una pequeña cantidad de protuberancias, de forma parecida a como los pequeños contoneos dibujados en un globo con un Marcador Mágico se estiran claramente a través de la superficie del globo cuando lo haces estallar. Esto, los físicos creen, es el origen de la protuberancia que el firme creyente en el modelo estándar del big bang simplemente declara, sin justificación, ser "como era en ese entonces". A través del enorme estiramiento de las inevitables fluctuaciones cuánticas, la cosmología inflacionaria proporciona una explicación: la expansión inflacionaria estira diminutos e inhomogéneos nervios cuánticos y los difunde claramente por el cielo.

Durante los pocos miles de millones de años que siguieron al final de la breve fase inflacionaria, estos pequeños bultos continuaron creciendo a través de la aglomeración gravitacional. Al igual que en la imagen estándar del big bang, los grumos tienen una atracción gravitatoria ligeramente mayor que la de sus alrededores, por lo que atraen el material cercano, creciendo aún más. Con el

tiempo, los grumos crecieron lo suficiente como para producir la materia que compone las galaxias y las estrellas que las habitan. Ciertamente, hay *numerosos* pasos de detalle para pasar de un pequeño bulto a una galaxia, y muchos aún necesitan ser aclarados. Pero el marco general es claro: en un mundo cuántico, nada es nunca perfectamente uniforme debido al temblor inherente al principio de incertidumbre. Y, en un mundo cuántico que experimentó una expansión inflacionaria, tal falta de uniformidad puede extenderse desde el micromundo a escalas mucho más grandes, proporcionando las semillas para la formación de grandes cuerpos astrofísicos como las galaxias.

Esa es la idea básica, así que siéntase libre de saltar el siguiente párrafo. Pero para aquellos que estén interesados, me gustaría hacer la discusión un poco más precisa. Recordemos que la expansión inflacionaria llegó a su fin cuando el valor del campo de inflado se deslizó por su potencial tazón de energía y el campo renunció a toda su energía acumulada y a la presión negativa. Describimos esto como algo que ocurre uniformemente en todo el espacio, el valor de inflado aquí, allá y en todas partes experimentó la misma evolución, ya que eso es lo que naturalmente emerge de las ecuaciones gobernantes. Sin embargo, esto es estrictamente cierto sólo si ignoramos los efectos de la mecánica cuántica. En promedio*,* el valor del campo de inflado se deslizó efectivamente por el cuenco, como esperamos al pensar en un simple objeto clásico como una canica rodando por una pendiente. Pero al igual que una rana que se desliza por el cuenco es probable que salte y se sacuda en el camino, la mecánica cuántica nos dice que el campo de inflado experimentó temblores y sacudidas. En su camino hacia abajo, el valor puede haber saltado repentinamente un poco hacia arriba o haberse sacudido un poco hacia abajo. Y debido a este temblor, el inflado alcanzó el valor de menor energía en diferentes lugares en momentos ligeramente diferentes. A su vez, la expansión inflacionaria se detuvo en momentos ligeramente diferentes en diferentes lugares del espacio, de modo que la cantidad de expansión espacial en diferentes lugares varió ligeramente, dando lugar a inhomogeneidades-arrugas-similares a las que se ven cuando el pizzero estira la masa un poco más en un lugar que en otro y crea un pequeño bulto. Ahora la intuición normal es que los nervios que surgen de la mecánica cuántica serían demasiado pequeños para ser relevantes en las escalas astrofísicas. Pero con la inflación, el espacio se expandió a un ritmo tan colosal, duplicando su tamaño cada 10^{-37} segundos, que incluso una duración ligeramente diferente de la inflación en lugares cercanos resultó en una arruga significativa. De hecho, los cálculos realizados en realizaciones específicas de la inflación han mostrado que las inhomogeneidades producidas de esta manera tienen tendencia a ser demasiado grandes; los investigadores a menudo tienen que ajustar los detalles en un modelo inflacionario dado (la forma precisa del cuenco de energía potencial del campo de inflado) para asegurar que los nervios cuánticos no predigan un universo *demasiado abultado*. Y así, la cosmología inflacionaria proporciona un mecanismo preparado para comprender cómo la falta de uniformidad a pequeña escala responsable de las

estructuras grumosas como las estrellas y las galaxias surgió en un universo que en la mayor de las escalas parece completamente homogéneo.

Según la inflación, las más de 100 mil millones de galaxias, que brillan en el espacio como diamantes celestiales, no son más que mecánicas cuánticas escritas a lo largo del cielo. Para mí, esta realización es una de las mayores maravillas de la era científica moderna.

La Edad de Oro de la Cosmología

La dramática evidencia que apoya estas ideas proviene de meticulosas observaciones basadas en satélites de la temperatura de la radiación de fondo de microondas. He enfatizado varias veces que la temperatura de la radiación en una parte del cielo coincide con la de otra con gran precisión. Pero lo que aún tengo que mencionar es que en el cuarto dígito después del decimal, las temperaturas en diferentes lugares . Las mediciones de precisión, realizadas por primera vez en 1992 por el COBE (el satélite Explorador del Fondo Cósmico) y más recientemente por el WMAP (la sonda de anisotropía de microondas Wilkinson), han determinado que mientras que la temperatura podría ser de 2,7249 Kelvin en un lugar del espacio, podría ser de 2,7250 Kelvin en otro, y de 2,7251 Kelvin en otro aún.

Lo maravilloso es que estas extraordinariamente pequeñas variaciones de temperatura siguen un patrón en el cielo que puede ser explicado atribuyéndolas al mismo mecanismo que se ha sugerido para la formación de galaxias semillas: fluctuaciones cuánticas estiradas por la inflación. La idea aproximada es que cuando los diminutos nervios cuánticos se esparcen por el espacio, lo hacen ligeramente más caliente en una región y ligeramente más frío en otra (los fotones recibidos de una región ligeramente más densa gastan más energía superando el campo gravitatorio ligeramente más fuerte, y por lo tanto su energía y temperatura son ligeramente inferiores a las de los fotones recibidos de una región menos densa

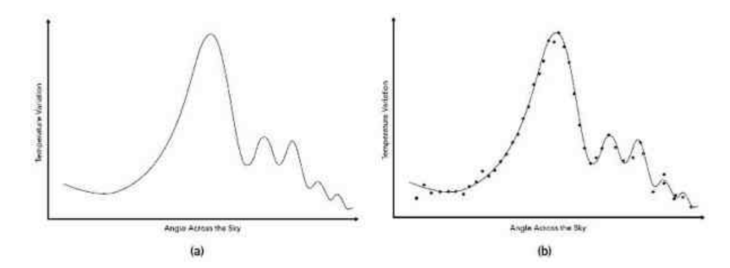


Figura 11.1 inflacionaria para las variaciones de temperatura de la radiación de fondo de microondas de un punto a otro del cielo. Comparación de esas predicciones con las observaciones basadas en satélites.

región). Los físicos han realizado cálculos precisos basados en esta propuesta, y han generado predicciones sobre cómo debería variar la temperatura de la radiación de microondas de un lugar a otro del cielo, como se ilustra en la Figura 11.1a. (Los detalles no son esenciales, pero el eje horizontal está relacionado con la separación angular de dos puntos en el cielo, y el eje vertical está relacionado con su diferencia de temperatura). En la Figura 11.1b, estas predicciones se comparan con las observaciones de los satélites, representadas por pequeños rombos, y como se puede ver hay un *acuerdo extraordinario.*

Espero que se sorprenda por esta concordancia de teoría y observación, porque si no, significa que no he podido transmitir toda la maravilla del resultado. Así que, por si acaso, permítanme volver a enfatizar lo que está pasando aquí: los telescopios a bordo de satélites han medido recientemente la temperatura de los fotones de microondas que han estado viajando hacia nosotros, sin impedimentos, durante casi 14.000 millones de años. Han encontrado que los fotones que llegan desde diferentes direcciones en el espacio tienen temperaturas casi idénticas, con diferencias de no más de unas pocas diez milésimas de grado. Además, las observaciones han mostrado que estas pequeñas diferencias de temperatura llenan un patrón particular en el cielo, demostrado por la progresión ordenada de los diamantes en la figura 11.1b. Y, maravilla de maravillas, los cálculos realizados hoy en día, utilizando el marco inflacionario, son capaces de *explicar* el patrón de estas minúsculas variaciones de temperatura -variaciones establecidas hace casi 14.000 millones de años- y, para colmo, la clave de esta explicación implica nerviosismo derivado de la incertidumbre cuántica. Vaya.

Este éxito ha convencido a muchos físicos de la validez de la teoría inflacionaria. Lo que es de igual importancia, estas y otras mediciones astronómicas de precisión, que sólo recientemente se han hecho posibles, han permitido que la cosmología madure de un campo basado en la especulación y la conjetura a uno firmemente basado en la observación, una madurez que ha inspirado a muchos en el campo a llamar a nuestra era la edad de oro de la cosmología.

Creando un Universo

Con tal progreso, los físicos se han motivado para ver cuánto más lejos puede llegar la cosmología inflacionaria. ¿Puede, por ejemplo, resolver el último misterio, encapsulado en la pregunta de Leibniz de por qué hay un universo? Bueno, al menos con nuestro nivel actual de comprensión, eso es pedir demasiado. Incluso si una teoría cosmológica avanzara en esta cuestión, podríamos preguntarnos por qué esa teoría particular -sus supuestos, ingredientes y ecuaciones- era relevante,

haciendo así que la cuestión del origen retrocediera un paso más. Si la lógica por sí sola requiriera que el universo existiera y se rigiera por un conjunto único de leyes con ingredientes únicos, entonces tal vez tendríamos una historia convincente. Pero, hasta la fecha, eso no es más que una quimera.

Una pregunta relacionada, pero algo menos ambiciosa, que también se ha planteado de varias maneras a través de los tiempos, es: ¿De dónde vino toda la masa/energía que compone el universo? Aquí, aunque la cosmología inflacionaria no proporciona una respuesta completa, ha planteado la pregunta bajo una nueva e intrigante luz.

Para entender cómo, piensa en una caja enorme pero flexible llena de muchos miles de niños pululando, corriendo y saltando incesantemente. Imaginen que la caja es completamente impermeable, por lo que no puede escapar el calor o la energía, pero debido a que es flexible, sus paredes pueden moverse hacia afuera. A medida que los niños se estrellan implacablemente contra cada una de las paredes de la caja -cientos a la vez, con cientos más inmediatamente a seguir- la caja se expande constantemente. Ahora, se podría esperar que debido a que las paredes son impermeables, la energía total encarnada por los niños en enjambre permanecerá completamente dentro de la caja en expansión. Después de todo, ¿a dónde más podría ir su energía? Bueno, aunque es una propuesta razonable, no es del todo correcta. *Hay* algún lugar para que vaya. Los niños gastan energía cada vez que se estrellan contra una pared, y gran parte de esta energía se transfiere al *movimiento de la pared.* La expansión misma de la caja absorbe, y por lo tanto agota, la energía de los niños.

Aunque el espacio no tiene paredes, un tipo similar de transferencia de energía tiene lugar a medida que el universo se expande. Así como los niños de movimiento rápido trabajan contra la fuerza interior ejercida por las paredes de la caja al expandirse, las partículas de movimiento rápido en nuestro universo trabajan contra una fuerza interior al expandirse el espacio: Trabajan contra la fuerza interior de la gravedad. Y así como la energía total encarnada por los niños desciende porque se transfiere continuamente a la energía de las paredes a medida que la caja se expande, la energía total transportada por las partículas ordinarias de materia y radiación desciende porque se transfiere continuamente *a la gravedad* a medida que el universo se expande. En resumen, al trazar una analogía entre la fuerza interior ejercida por las paredes de la caja y la fuerza interior ejercida por la gravedad (una analogía que puede establecerse matemáticamente), concluimos que la gravedad agota la energía de las partículas de materia y radiación de movimiento rápido a medida que el espacio se hincha. La pérdida de energía de las partículas de movimiento rápido de la expansión cósmica ha sido confirmada por las observaciones de la radiación de fondo de microondas. [26]

Modifiquemos un poco nuestra analogía para comprender cómo un campo de inflado impacta nuestra descripción del intercambio de energía a medida que el espacio se expande. Imaginemos que unos cuantos bromistas entre los niños enganchan una serie de enormes gomas elásticas entre cada una de las paredes opuestas de la caja. Las bandas elásticas ejercen una presión negativa hacia adentro en las paredes de la caja, que tiene exactamente el efecto opuesto a la presión positiva hacia afuera de los niños; en lugar de transferir energía a la expansión de la caja, la presión negativa de las bandas elásticas "absorbe" la energía de la expansión. A medida que la caja se expande, las bandas elásticas se tensan cada vez más, lo que significa *que incorporan* cantidades cada vez mayores de energía.

Este escenario modificado es relevante para la cosmología porque, como hemos aprendido, como las bandas elásticas de los bromistas, un campo de inflado uniforme ejerce una presión negativa dentro de un universo en expansión. Y así, al igual que la energía total incorporada por las bandas elásticas aumenta a medida que la caja se expande porque extraen energía de las paredes de la caja, la energía total incorporada por el campo de inflado aumenta a medida que el universo se expande porque *gravedad.* [27]

Para resumir: *a medida que el universo se expande, la materia y la radiación pierden energía por la gravedad mientras que un campo de inflado gana energía por la gravedad.*

La naturaleza fundamental de estas observaciones se hace evidente cuando tratamos de explicar el origen de la materia y la radiación que forman las galaxias, las estrellas y todo lo demás que habita el cosmos. En la teoría estándar del big bang, la masa/energía transportada por la materia y la radiación ha disminuido constantemente a medida que el universo se ha expandido, por lo que la masa/energía en el universo primitivo excedía en gran medida lo que vemos hoy en día. Así, en lugar de ofrecer una explicación de dónde se originó toda la masa/energía que actualmente habita el universo, el big bang estándar libra una interminable batalla cuesta arriba: cuanto más atrás parece la teoría, *más masa/energía* debe explicar de alguna manera.

Sin embargo, en la cosmología inflacionaria, sucede todo lo contrario. Recordemos que la teoría inflacionaria argumenta que la materia y la radiación se produjeron al final de la fase inflacionaria cuando el campo de inflado liberó su energía acumulada rodando de percha a valle en su tazón de energía potencial. La pregunta relevante, por lo tanto, es si, justo cuando la fase inflacionaria estaba llegando a su fin, la teoría puede dar cuenta del campo de inflado que incorpora la *estupenda* cantidad de masa/energía necesaria para producir la materia y la radiación en el universo de hoy.

La respuesta a esta pregunta es que la inflación puede, sin siquiera sudar. Como acabamos de explicar, el campo de inflado es un parásito gravitacional, se alimenta de la gravedad, y por lo tanto la energía total que el campo de inflado transportaba aumentaba a medida que el espacio se expandía. Más precisamente, el análisis matemático muestra que la *densidad* de energía del campo de inflado permaneció constante durante toda la fase inflacionaria de rápida expansión, lo que implica que la energía total que encarnaba creció en proporción directa al volumen del espacio que llenaba. En el capítulo anterior, vimos que el tamaño del universo aumentó por lo menos en un factor de 10^{30} durante la inflación, lo que significa que el volumen del universo aumentó en un factor de por lo menos $(10^{30})^3 = 10^{90}$. En consecuencia, la energía incorporada en el campo de inflado *aumentó en el* mismo gran factor: al final de la fase de inflación, unos $^{10-35}$ segundos después de que comenzara, la energía en el campo de inflado creció en un factor del orden de 10^{90}, si no más. Esto significa que al comienzo de la inflación, el campo de inflado *no necesitaba tener mucha energía, ya que la enorme expansión que estaba a punto de producirse amplificaría enormemente la energía que llevaba.* Un simple cálculo muestra que una pequeña pepita del orden de 10 $^{a\ 26\ \text{centímetros}}$ de diámetro, llena de un campo de inflado uniforme, y que pesa apenas *20 libras,* adquiriría, a través de la consiguiente expansión inflacionaria, suficiente energía para dar cuenta de todo lo que vemos en el universo hoy en día. [2]

Así, en marcado contraste con la teoría estándar del big bang, en la que la masa/energía total del universo primitivo era enorme más allá de las palabras, la cosmología inflacionaria, al "extraer" la gravedad, puede producir toda la materia ordinaria y la radiación del universo a partir de una diminuta mota de veinte libras de espacio inflado. Esto no responde en absoluto a la pregunta de Leibniz de por qué hay algo en lugar de nada, ya que aún no hemos explicado por qué hay un inflado o incluso el espacio que ocupa. Pero el algo que necesita explicación pesa mucho menos que mi perro Rocky, y ese es ciertamente un punto de partida muy diferente al previsto en el big bang estándar. [28]

La inflación, la suavidad y la flecha del tiempo

Tal vez mi entusiasmo ya ha traicionado mi prejuicio, pero de todos los avances que la ciencia ha logrado en nuestra época, los avances en la cosmología me llenan de la mayor admiración y humildad. Parece que nunca he perdido la prisa que sentí inicialmente hace años cuando leí por primera vez los fundamentos de la relatividad general y me di cuenta de que desde nuestro pequeño rincón del espacio tiempo podemos aplicar la teoría de Einstein para aprender sobre la evolución de todo el cosmos. Ahora, unas décadas más tarde, el progreso tecnológico está sometiendo estas propuestas, antes abstractas, sobre cómo se comportó el universo en sus primeros momentos, a pruebas de observación, y las teorías *realmente funcionan.*

Recordemos, sin embargo, que además de la relevancia general de la cosmología en la historia del espacio y el tiempo, los capítulos 6 y 7 nos lanzaron a un estudio de la historia temprana del universo con un objetivo específico: encontrar el origen de la flecha del tiempo. Recordad de esos capítulos que el único marco convincente que encontramos para explicar la flecha del tiempo fue que el universo primitivo tenía un orden extremadamente alto, es decir, una entropía extremadamente baja, lo que preparó el terreno para un futuro en el que la entropía se hizo cada vez mayor. Así como las páginas de Guerra *y Paz* no habrían tenido la capacidad de ser cada vez más desordenadas si no hubieran sido agradables y ordenadas en algún momento, el universo tampoco habría tenido la capacidad de ser cada vez más desordenado -derrame de leche, rotura de huevos, gente envejeciendo- a menos que hubiera estado en una configuración altamente ordenada en un principio. El rompecabezas que encontramos es explicar cómo este punto de partida de alto orden y baja entropía llegó a ser.

La cosmología inflacionaria ofrece un progreso sustancial, pero permítanme primero recordarles con más precisión el rompecabezas, en caso de que alguno de los detalles relevantes se les haya pasado por alto.

Hay fuertes evidencias y pocas dudas de que, al principio de la historia del universo, la materia se esparció uniformemente por el espacio. Normalmente, esto se caracterizaría como una configuración de alta entropía -como las moléculas de dióxido de carbono de una botella de Coca-Cola esparcidas uniformemente por una habitación- y por lo tanto sería tan común que difícilmente requeriría una explicación. Pero cuando la gravedad importa, como lo hace al considerar el universo entero, una distribución uniforme de la materia es una configuración rara, de baja entropía y altamente ordenada, porque la gravedad impulsa a la materia a formar grupos. De forma similar, una curvatura espacial suave y uniforme también tiene una entropía muy baja; está muy ordenada comparada con una curvatura espacial muy desigual y no uniforme. (Así como hay muchas maneras de desordenar las páginas de *Guerra y Paz* pero sólo una manera de ordenarlas, también hay *muchas* maneras de que el espacio tenga una forma desordenada y no uniforme, pero muy pocas maneras de que pueda ser completamente ordenado, liso y uniforme). Así que nos quedamos con el enigma: ¿Por qué el universo primitivo tenía una distribución uniforme de materia de baja entropía (altamente ordenada) en lugar de una distribución de materia grumosa de alta entropía (altamente desordenada) como una población diversa de agujeros negros? ¿Y por qué la curvatura del espacio era lisa, ordenada y uniforme con una precisión extremadamente alta en lugar de estar plagada de una variedad de enormes deformaciones y curvas severas, también como las generadas por los agujeros negros?

Como se discutió en detalle por primera vez por Paul Davies y Don Page, [3] la cosmología inflacionaria da una importante visión de estos temas. Para ver cómo, tenga en cuenta que una suposición esencial del rompecabezas es que una vez

que un grupo se forma aquí o allá, su mayor atracción gravitatoria atrae aún más material, causando que se haga más grande; en consecuencia, una vez que una arruga en el espacio se forma aquí o allá, su mayor atracción gravitatoria tiende a hacer la arruga aún más severa, conduciendo a una curvatura espacial desigual y altamente no uniforme. Cuando la gravedad importa, las configuraciones ordinarias, poco notables y de alta entropía son grumosas y desiguales.

Pero tened en cuenta lo siguiente: este razonamiento se basa completamente en la naturaleza atractiva de la gravedad ordinaria. Los bultos y protuberancias crecen porque *tiran con fuerza del* material cercano, convenciendo a dicho material para que se una al bulto. Durante la breve fase inflacionaria, sin embargo, la gravedad era *repulsiva* y eso lo cambió todo. Toma la forma del espacio. El enorme empuje hacia afuera de la gravedad repulsiva hizo que el espacio se hinchara tan rápidamente que las protuberancias y las deformaciones iniciales se estiraron suavemente, de la misma manera que al inflar completamente un globo arrugado se extiende su superficie arrugada. [29] Es más, como el volumen del espacio aumentó en un factor colosal durante el breve período inflacionario, la densidad de cualquier grupo de materia se diluyó completamente, de la misma manera que la densidad de los peces de su acuario se diluiría si el volumen del tanque aumentara repentinamente al de una piscina olímpica. Así pues, aunque la gravedad atractiva hace que crezcan los grupos de materia y los pliegues del espacio, la gravedad repulsiva hace lo contrario: hace que disminuyan, lo que conduce a un resultado cada vez más suave y uniforme.

Así, al final del estallido inflacionario, el tamaño del universo había crecido fantásticamente, cualquier falta de uniformidad en la curvatura del espacio se había estirado, y cualquier grupo inicial de cualquier cosa se había diluido hasta el punto de la irrelevancia. Además, a medida que el campo de inflado se deslizaba hasta el fondo de su tazón de energía potencial, poniendo fin a la explosión de expansión inflacionaria, convertía su energía acumulada en un baño casi uniforme de partículas de materia ordinaria en todo el espacio (uniforme hasta las diminutas pero críticas inhomogeneidades provenientes de los nervios cuánticos). En total, todo esto suena como un gran progreso. El resultado al que hemos llegado a través de la inflación *-una expansión espacial suave y uniforme poblada por una distribución casi uniforme de la materia-* era exactamente lo que estábamos tratando de explicar. Es exactamente la configuración de baja entropía que necesitamos para explicar la flecha del tiempo.

Entropía e inflación

De hecho, se trata de un progreso significativo. Pero quedan dos cuestiones importantes.

En primer lugar, parece que estamos concluyendo que el estallido inflacionario suaviza las cosas y por lo tanto disminuye la entropía total, encarnando un mecanismo físico - no sólo una casualidad estadística - que parece violar la segunda ley de la termodinámica. En ese caso, o bien nuestra comprensión de la segunda ley o nuestro razonamiento actual tendría que estar equivocado. En realidad, sin embargo, no tenemos que enfrentarnos a ninguna de estas opciones, porque la entropía total no baja como resultado de la inflación. Lo que realmente sucede durante el estallido inflacionario es que la entropía total sube, pero sube *mucho menos de lo que podría haber subido.* Verán, al final de la fase inflacionaria, el espacio se estiró suavemente y por lo tanto la contribución gravitatoria a la entropía -la entropía asociada con la posible forma desigual, no ordenada y no uniforme del espacio- fue mínima. Sin embargo, cuando el campo de inflado se deslizó por su tazón y renunció a su energía acumulada, se estima que produjo alrededor de 10^{80} partículas de materia y radiación. Un número tan grande de partículas, como un libro con un gran número de páginas, encarna una enorme cantidad de entropía. Así, aunque la entropía gravitacional disminuyó, el aumento de la entropía por la producción de todas estas partículas se compensó con creces. La entropía total aumentó, tal como esperamos de la segunda ley.

Pero, y este es el punto importante, el estallido inflacionario, al suavizar el espacio y asegurar un campo gravitatorio homogéneo, uniforme y de baja entropía, creó una enorme *brecha* entre lo que era la contribución de la gravedad a la entropía y lo que podría haber sido. La entropía general aumentó durante la inflación, pero en una cantidad ínfima en comparación con lo que *podría* haber aumentado. Es en este sentido que la inflación generó un universo de baja entropía: al final de la inflación, la entropía se había incrementado, pero en ninguna parte cerca del factor por el cual la extensión espacial había aumentado. Si la entropía se compara con los impuestos sobre la propiedad, sería como si la ciudad de Nueva York adquiriera el desierto del Sahara. El total de los impuestos sobre la propiedad recaudados aumentaría, pero en una cantidad ínfima en comparación con el aumento total de la superficie.

Desde el final de la inflación, la gravedad ha tratado de compensar la diferencia de entropía. Cada grupo -ya sea una galaxia, o una estrella en una galaxia, o un planeta, o un agujero negro- en el que la gravedad se ha desviado posteriormente de la uniformidad (sembrada por la diminuta falta de uniformidad de los nervios cuánticos) ha aumentado la entropía y ha llevado a la gravedad un paso más cerca de realizar su potencial de entropía. En este sentido, entonces, la inflación es un mecanismo que produjo un gran universo con una entropía gravitatoria relativamente baja, y de esa manera preparó el escenario para los siguientes miles de millones de años de aglomeración gravitatoria cuyos efectos ahora presenciamos. Y así la cosmología inflacionaria da una dirección a la flecha del tiempo generando un pasado con una entropía gravitatoria extremadamente baja; el futuro es la dirección en la que esta entropía crece.[4]

La segunda cuestión se hace evidente cuando continuamos por el camino al que la flecha del tiempo nos llevó en el capítulo 6. Desde un huevo, a la gallina que lo puso, al alimento de la gallina, al reino vegetal, al calor y la luz del sol, al gas primordial uniformemente distribuido del Big Bang, seguimos la evolución del universo hacia un pasado que tenía un orden cada vez mayor, en cada etapa empujando el rompecabezas de la baja entropía un paso más atrás en el tiempo. Nos acabamos de dar cuenta de que una etapa aún más temprana de expansión inflacionaria puede explicar naturalmente las suaves y uniformes secuelas del bang. ¿Pero qué hay de la inflación en sí misma? ¿Podemos explicar el eslabón inicial de esta cadena que hemos seguido? ¿Podemos explicar por qué las condiciones eran las adecuadas para que se produjera un estallido inflacionario?

Este es un asunto de suma importancia. No importa cuántos enigmas resuelva la cosmología inflacionaria en teoría, si una era de expansión inflacionaria nunca tuvo lugar, el enfoque se hará irrelevante. Además, dado que no podemos volver al universo primitivo y determinar directamente si la inflación ocurrió, evaluar si hemos hecho un progreso real en el establecimiento de una dirección para la flecha del tiempo requiere que determinemos la *probabilidad de* que las condiciones necesarias para un estallido inflacionario se lograron. Es decir, los físicos se irritan ante la dependencia del big bang estándar en condiciones iniciales homogéneas y finamente ajustadas que, aunque motivadas por la observación, son teóricamente inexplicables. Es profundamente insatisfactorio que el estado de baja entropía del universo temprano simplemente se asuma; se siente hueco que la flecha del tiempo se imponga al universo, sin explicación. A primera vista, la inflación ofrece un progreso al mostrar que lo que se asume en el big bang estándar emerge de la evolución inflacionaria. Pero si la iniciación de la inflación requiere otras condiciones muy especiales y de muy baja entropía, nos encontraremos de nuevo en el punto de partida. Simplemente habremos cambiado las condiciones especiales del big bang por las necesarias para iniciar la inflación, y el rompecabezas de la flecha del tiempo seguirá siendo igual de desconcertante.

¿Cuáles son las condiciones necesarias para la inflación? Hemos visto que la inflación es el resultado inevitable de que el valor del campo de inflado se atasque, por un momento y dentro de una región diminuta, en la meseta de alta energía en su potencial tazón de energía. Nuestra tarea, por lo tanto, es determinar cuán probable es esta configuración inicial para la inflación. Si iniciar la inflación resulta fácil, estaremos en gran forma. Pero si las condiciones necesarias son extraordinariamente improbables de ser alcanzadas, simplemente habremos cambiado la cuestión de la flecha del tiempo un paso más atrás, para encontrar la explicación de la configuración del campo de inflado de baja entropía que hizo rodar la pelota.

Primero describiré el pensamiento actual sobre este tema con la luz más optimista, y luego volveré a los elementos esenciales de la historia que permanecen turbios.

Boltzmann Redux

Como se mencionó en el capítulo anterior, es mejor pensar en el estallido inflacionario como un evento que ocurre en un universo preexistente, en lugar de pensarlo como la creación del propio universo. Aunque no tenemos una comprensión incuestionable de cómo era el universo durante esa era preinflacionaria, veamos hasta dónde podemos llegar si asumimos que las cosas estaban en un estado completamente ordinario, de alta entropía. Específicamente, imaginemos que el espacio primordial preinflacionario estaba plagado de alabeos y baches, y que el campo de inflado también estaba altamente desordenado, su valor saltando de un lado a otro como la rana en el tazón de metal caliente.

Ahora, así como se puede esperar que si se juega pacientemente en una máquina tragaperras justa, tarde o temprano los diales que giran al azar aterrizarán en diamantes triples, esperamos que tarde o temprano una fluctuación de azar dentro de esta arena altamente energética y turbulenta del universo primordial causará que el valor del campo de inflado salte al valor correcto y uniforme en alguna pequeña pepita de espacio, iniciando un estallido exterior de expansión inflacionaria. Como se ha explicado en la sección anterior, los cálculos muestran que la pepita de espacio sólo necesita haber sido diminuta -del orden de $10^{\text{a } 26 \text{ centímetros}}$ de diámetro- para que la expansión cosmológica subsiguiente (expansión inflacionaria seguida de la expansión estándar del big bang) la haya estirado más que el universo que vemos hoy en día. Así, en lugar de suponer o simplemente declarar que las condiciones del universo primitivo eran las adecuadas para que se produjera la expansión inflacionaria, en esta forma de pensar las cosas, una fluctuación ultramicroscópica de apenas 20 libras de peso, que se produjo dentro de un entorno ordinario y poco llamativo de desorden, dio lugar a las condiciones necesarias.

Es más, así como la máquina tragamonedas también generará una amplia variedad de resultados no ganadores, en otras regiones del espacio primordial también habrían ocurrido otros tipos de fluctuaciones de inflado. En la mayoría, la fluctuación no habría tenido el valor correcto o habría sido lo suficientemente uniforme para que ocurriera la expansión inflacionaria. (Incluso en una región de apenas $10^{-26 \text{ centímetros}}$ de diámetro, el valor de un campo puede variar salvajemente). Pero todo lo que nos importa es que hubo una pepita que produjo el estallido inflacionario del espacio que proporcionó el primer eslabón de la cadena de baja entropía, que finalmente condujo a nuestro cosmos familiar. Como sólo vemos nuestro gran universo, sólo necesitamos la tragaperras cósmica para pagar una vez. [5]

Dado que estamos rastreando el universo hasta una fluctuación estadística del caos primordial, esta explicación de la flecha del tiempo comparte ciertas

características con la propuesta original de Boltzmann. Recuerden que en el capítulo 6 Boltzmann sugirió que todo lo que vemos ahora surgió como una fluctuación rara, pero de vez en cuando esperable, de un desorden total. El problema con la formulación original de Boltzmann, sin embargo, era que no podía explicar por qué la fluctuación fortuita se había ido tan lejos por la borda y había producido un universo enormemente más ordenado de lo que tendría que ser incluso para soportar la vida tal como la conocemos. ¿Por qué el universo es tan vasto, teniendo miles de millones y miles de millones de galaxias, cada una con miles de millones y miles de millones de estrellas, cuando podría haber recortado drásticamente las distancias teniendo, digamos, sólo unas pocas galaxias, o incluso sólo una?

Desde el punto de vista estadístico, sería *mucho* más probable una fluctuación más modesta que produjera algún orden pero no tanto como la que vemos actualmente. Además, como en promedio la entropía está aumentando, el razonamiento de Boltzmann sugiere que sería mucho más probable que todo lo que vemos hoy en día *justo ahora surgiera* como un raro salto estadístico hacia una menor entropía. Recordemos la razón: cuanto más atrás se produjo la fluctuación, más baja fue la entropía que tuvo que alcanzar (la entropía comienza a aumentar después de cualquier descenso a una entropía baja, como en la figura 6.4, por lo que si la fluctuación ocurrió ayer, debe haber descendido a la entropía baja de ayer, y si ocurrió hace mil millones de años, debe haber descendido a la entropía aún más baja de esa época). Por lo tanto, cuanto más atrás en el tiempo, más drástica e improbable es la fluctuación requerida. Por lo tanto, es mucho más probable que el salto haya ocurrido. Pero si aceptamos esta conclusión, no podemos confiar en los recuerdos, los registros o incluso las leyes de la física que subyacen a la discusión en sí, una posición completamente intolerable.

La tremenda ventaja de la encarnación inflacionaria de la idea de Boltzmann es que una *pequeña* fluctuación temprana -u*modesto salto* a las condiciones favorables, dentro de una *diminuta* pepita de espacio- inevitablemente produce el enorme y ordenado universo del que somos conscientes. Una vez que se inició la expansión inflacionaria, la pequeña pepita se estiró *inexorablemente* a escalas al menos tan grandes como el universo que vemos actualmente, y por lo tanto no hay ningún misterio en cuanto a por qué el universo no se redujo; no hay ningún misterio en cuanto a por qué el universo es vasto y está poblado por un enorme número de galaxias. Desde el principio, la inflación le dio al universo un trato asombroso. Un salto a la baja entropía dentro de una pequeña pepita de espacio fue impulsado por la expansión inflacionaria en los vastos alcances del cosmos. Y, lo que es más importante, la expansión inflacionaria no sólo dio lugar a cualquier viejo gran universo. Dio lugar a *nuestro* gran universo - la inflación explica la forma del espacio, explica la uniformidad a gran escala, e incluso explica las inhomogeneidades a escala "más pequeña" como las galaxias y las variaciones de temperatura en la radiación de fondo. La inflación encierra un gran poder explicativo y predictivo en una sola fluctuación de baja entropía.

Y entonces Boltzmann bien podría haber tenido razón. Todo lo que vemos puede haber sido el resultado de una fluctuación casual de un estado altamente desordenado de caos primitivo. En esta realización de sus ideas, sin embargo, podemos confiar en nuestros registros y podemos confiar en nuestros recuerdos: la fluctuación no ocurrió hace poco. El pasado realmente ocurrió. Nuestros registros son registros de cosas que tuvieron lugar. La expansión inflacionaria amplifica una pequeña mota de orden en el universo primitivo - "enrolló" el universo en una enorme extensión con una mínima entropía gravitacional - por lo que los 14.000 millones de años de desenrollamiento posterior, de agrupación posterior en galaxias, estrellas y planetas, no presenta ningún rompecabezas.

De hecho, este enfoque nos dice incluso un poco más. Así como es posible ganar el premio gordo en varias máquinas tragaperras en el piso del Bellagio, en el estado primordial de alta entropía y caos general no había razón para que las condiciones necesarias para la expansión inflacionaria surgieran sólo en una sola pepita espacial. En su lugar, como Andrei Linde ha propuesto, podría haber habido muchas pepitas dispersas aquí y allá que sufrieron una expansión inflacionaria en el espacio. Si así fuera, nuestro universo sería sólo uno entre muchos que brotaron, y tal vez sigan brotando, cuando las fluctuaciones de la casualidad crearon las condiciones adecuadas para un estallido inflacionario, como se ilustra en la figura 11.2. Como estos otros universos probablemente estarían separados para siempre del nuestro, es difícil imaginar cómo podríamos llegar a establecer si esta imagen del "multiverso" es cierta. Sin embargo, como marco conceptual, es a la vez rico y tentador. Entre otras cosas, sugiere un posible cambio en la forma en que pensamos sobre la cosmología: En el capítulo 10, describí la inflación como un "front end" de la teoría del big bang estándar, en la que el bang se identifica con un fugaz estallido de rápida expansión. Pero si pensamos en el brote inflacionario de cada nuevo universo de la figura 11.2 como su propio bang, entonces la inflación en sí misma se ve mejor como el marco cosmológico global dentro del cual ocurren las evoluciones del big bang, burbuja por burbuja. Así, en lugar de incorporar la inflación a la teoría del big bang estándar, en este enfoque el big bang estándar se incorporaría a la inflación.

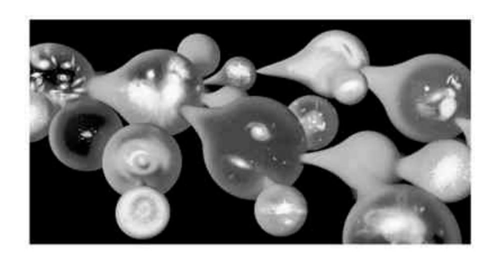


Figura 11.2 La inflación puede ocurrir repetidamente, brotando nuevos universos de los más antiguos.

La inflación y el huevo

Entonces, ¿por qué ves una salpicadura de huevo pero no una salpicadura de agua? ¿De dónde viene la flecha del tiempo que todos experimentamos? Aquí es donde este enfoque nos ha llevado. A través de una fluctuación fortuita pero a menudo esperable de un estado primordial poco notable con alta entropía, una diminuta pepita de espacio de veinte libras logró condiciones que llevaron a una breve explosión de expansión inflacionaria. La tremenda hinchazón exterior dio como resultado que el espacio se estirara enormemente y fuera extremadamente suave, y, a medida que la ráfaga se acercaba a su fin, el campo de inflado renunció a su energía enormemente amplificada llenando el espacio casi uniformemente con materia y radiación. Al disminuir la gravedad repulsiva del inflatón, la gravedad atractiva ordinaria se convirtió en dominante. Y, como hemos visto, la gravedad atractiva explota las diminutas inhomogeneidades causadas por los nervios cuánticos para hacer que la materia se aglutine, formando galaxias y estrellas y, en última instancia, conduciendo a la formación del sol, la tierra, el resto del sistema solar y las otras características de nuestro universo observado. (Como se ha dicho, alrededor de 7.000 millones de años ATB, la gravedad repulsiva volvió a ser dominante, pero esto sólo es relevante en la mayor de las escalas cósmicas y no tiene un impacto directo en entidades más pequeñas como las galaxias individuales o nuestro sistema solar, donde todavía reina la gravedad atractiva ordinaria). La energía relativamente baja de entropía del sol fue utilizada por formas de vida vegetal y animal de baja entropía en la Tierra para producir aún más formas de vida de baja entropía, elevando lentamente la entropía total a través del calor y los desechos. Al final, esta cadena produjo una gallina que produjo un huevo... y ya saben el resto de la historia: el huevo se deslizó de la encimera de su cocina y salpicó en el suelo como parte del implacable impulso del universo hacia una mayor entropía. Es la naturaleza de baja entropía, altamente ordenada y uniformemente suave del tejido espacial producido por el estiramiento inflacionario lo que es el análogo de tener las páginas de *Guerra y Paz* todas en su apropiada disposición numérica; es este temprano estado de orden -la ausencia de severos baches o deformaciones o agujeros negros gigantescos- lo que preparó al universo para la subsiguiente evolución a una mayor entropía y por lo tanto proporcionó la flecha del tiempo que todos experimentamos. Con nuestro actual nivel de comprensión, esta es la explicación más completa para la flecha del tiempo que se ha dado.

¿La mosca de la pomada?

Para mí, esta historia de la cosmología inflacionaria y la flecha del tiempo es encantadora. De un salvaje y energético reino de caos primordial, surgió una fluctuación ultramicroscópica de un campo de inflado uniforme que pesaba mucho menos que el límite para el equipaje de mano. Esto inició la expansión

inflacionaria, que estableció una dirección para la flecha del tiempo, y el resto es historia.

Pero al contar esta historia, hemos hecho una suposición fundamental que aún no está justificada. Para evaluar la probabilidad de que la inflación se inicie, hemos tenido que especificar las características del reino preinflacionario del que se supone que ha surgido la expansión inflacionaria. El ámbito particular que hemos previsto -salvaje, caótico, energético- suena razonable, pero delinear esta descripción intuitiva con precisión matemática es un desafío. Además, es sólo una suposición. La conclusión es que no sabemos cómo eran las condiciones en el supuesto ámbito preinflacionario, en el borroso parche de la figura 10.3, y sin esa información no podemos hacer una evaluación convincente de la probabilidad de que se inicie la inflación; cualquier cálculo de la probabilidad depende sensiblemente de las suposiciones que hagamos.[6]

Con este agujero en nuestra comprensión, el resumen más sensato es que la inflación ofrece un poderoso marco explicativo que agrupa problemas aparentemente dispares -el problema del horizonte, el problema de la planicie, el problema del origen de la estructura, el problema de la baja entropía del universo primitivo- y ofrece una solución única que los aborda todos. Esto se siente bien. Pero para ir al siguiente paso, necesitamos una teoría que pueda hacer frente a las condiciones extremas características de la mancha borrosa -extremos de calor y densidad colosal- de modo que tengamos la oportunidad de obtener una visión aguda e inequívoca de los primeros momentos del cosmos.

Como aprenderemos en el próximo capítulo, esto requiere una teoría que pueda superar quizás el mayor obstáculo al que se ha enfrentado la física teórica durante los últimos ochenta años: una brecha fundamental entre la relatividad general y la mecánica cuántica. Muchos investigadores creen que un enfoque relativamente nuevo llamado teoría *de las supercuerdas* puede haber logrado esto, pero si la teoría de las supercuerdas es correcta, el tejido del cosmos es mucho más extraño de lo que casi nadie ha imaginado.

IV - ORÍGENES Y UNIFICACIÓN

12 - El mundo en una cuerda

EL TEJIDO SEGÚN LA TEORÍA DE LAS CUERDAS

Imagina un universo en el que para entender cualquier cosa necesitarías entender todo. Un universo en el que decir algo sobre por qué un planeta orbita una estrella,

sobre por qué una pelota de béisbol vuela a lo largo de una trayectoria particular, sobre cómo funciona un imán o una batería, sobre cómo funcionan la luz y la gravedad -un universo en el que decir algo sobre cualquier cosa- necesitarías descubrir las leyes más fundamentales y determinar cómo actúan sobre los mejores constituyentes de la materia. Afortunadamente, este universo no es nuestro universo.

Si así fuera, es difícil ver cómo la ciencia habría hecho algún progreso. A lo largo de los siglos, la razón por la que hemos sido capaces de avanzar es que hemos sido capaces de trabajar por partes; hemos sido capaces de desentrañar los misterios paso a paso, con cada nuevo descubrimiento yendo un poco más profundo que el anterior. Newton no necesitaba saber sobre los átomos para hacer grandes avances en la comprensión del movimiento y la gravedad. Maxwell no necesitaba saber sobre electrones y otras partículas cargadas para desarrollar una poderosa teoría del electromagnetismo. Einstein no necesitó abordar la encarnación primordial del espacio y el tiempo para formular una teoría de cómo se curvan al servicio de la fuerza gravitatoria. En cambio, cada uno de estos descubrimientos, así como los muchos otros que subyacen a nuestra actual concepción del cosmos, procedieron dentro de un contexto limitado que dejó sin respuesta muchas preguntas básicas. Cada descubrimiento fue capaz de contribuir con su propia pieza al rompecabezas, a pesar de que nadie sabía -y todavía no sabemos- qué gran cuadro de síntesis comprende todas las piezas del rompecabezas.

Una observación estrechamente relacionada es que, aunque la ciencia actual difiere mucho de la de hace incluso cincuenta años, sería simplista resumir el progreso científico en términos de nuevas teorías que derriben a sus predecesores. Una descripción más correcta es que cada nueva teoría perfecciona a su predecesora proporcionando un marco más preciso y de mayor alcance. La teoría de la gravedad de Newton ha sido reemplazada por la relatividad general de Einstein, pero sería ingenuo decir que la teoría de Newton estaba equivocada. En el dominio de los objetos que no se mueven tan rápido como la luz y no producen campos gravitatorios tan fuertes como los de los agujeros negros, la teoría de Newton es fantásticamente precisa. Sin embargo, esto no quiere decir que la teoría de Einstein sea una variante menor de la de Newton; en el curso de la mejora del enfoque de Newton sobre la gravedad, Einstein invocó un esquema conceptual totalmente nuevo, uno que alteró radicalmente nuestra comprensión del espacio y el tiempo. Pero el poder del descubrimiento de Newton dentro del dominio para el que lo intentó (movimiento planetario, movimiento terrestre común, y así sucesivamente) es incuestionable.

Imaginamos que cada nueva teoría nos acerca más a la esquiva meta de la verdad, pero si hay una teoría definitiva -una teoría que no puede ser refinada más, porque finalmente ha revelado el funcionamiento del universo en el nivel más profundo posible- es una pregunta que nadie puede responder. Aún así, el patrón

trazado durante los últimos trescientos años de descubrimiento da una tentadora evidencia de que tal teoría puede ser desarrollada. En términos generales, cada nuevo avance ha reunido una gama más amplia de fenómenos físicos bajo menos paraguas teóricos. Los descubrimientos de Newton mostraron que las fuerzas que gobiernan el movimiento planetario son las mismas que las que gobiernan el movimiento de los objetos que caen aquí en la Tierra. Los descubrimientos de Maxwell mostraron que la electricidad y el magnetismo son dos caras de la misma moneda. Los descubrimientos de Einstein mostraron que el espacio y el tiempo son tan inseparables como el tacto y el oro de Midas. Los descubrimientos de una generación de físicos a principios del siglo XX establecieron que la miríada de misterios de la microfísica podían ser explicados con precisión usando la mecánica cuántica. Más recientemente, los descubrimientos de Glashow, Salam y Weinberg mostraron que el electromagnetismo y la fuerza nuclear débil son dos manifestaciones de una sola fuerza - la fuerza electrodébil - y hay incluso evidencia tentativa y circunstancial de que la fuerza nuclear fuerte puede unirse a la fuerza electrodébil en una síntesis aún más grande.[1] Tomando todo esto en conjunto, vemos un patrón que va de la complejidad a la simplicidad, un patrón que va de la diversidad a la unidad. Las flechas explicativas parecen converger en un poderoso marco aún por descubrir que unificaría todas las fuerzas de la naturaleza y toda la materia en una única teoría capaz de describir todos los fenómenos físicos.

A Albert Einstein, que durante más de tres décadas buscó combinar el electromagnetismo y la relatividad general en una sola teoría, se le atribuye con razón el inicio de la búsqueda moderna de una teoría unificada. Durante largos períodos de esas décadas, fue el único que buscó una teoría unificada, y su apasionada pero solitaria búsqueda lo alejó de la corriente principal de la comunidad física. Durante los últimos veinte años, sin embargo, ha habido un resurgimiento en la búsqueda de una teoría unificada; el sueño solitario de Einstein se ha convertido en la fuerza motriz de toda una generación de físicos. Pero con los descubrimientos desde la época de Einstein ha llegado un cambio de enfoque. Aunque todavía no tenemos una teoría exitosa que combine la fuerza nuclear fuerte y la fuerza electrodébil, estas tres fuerzas (electromagnética, débil, fuerte) han sido descritas por un único lenguaje uniforme basado en la mecánica cuántica. Pero la relatividad general, nuestra teoría más refinada de la cuarta fuerza, está fuera de este marco. La relatividad general es una teoría clásica: no incorpora ninguno de los conceptos probabilísticos de la teoría cuántica. Por lo tanto, un objetivo primordial del programa de unificación moderno es combinar la relatividad general y la mecánica cuántica, y describir las cuatro fuerzas dentro del mismo marco de la mecánica cuántica. Este ha demostrado ser uno de los problemas más difíciles que la física teórica ha encontrado jamás.

Veamos por qué.

Nervios cuánticos y espacio vacío

Si tuviera que seleccionar la característica más evocadora de la mecánica cuántica, elegiría el principio de incertidumbre. Las probabilidades y las funciones de onda ciertamente proporcionan un marco radicalmente nuevo, pero es el principio de incertidumbre el que encapsula la ruptura con la física clásica. Recuerde, en los siglos XVII y XVIII, los científicos creían que una descripción completa de la realidad física equivalía a especificar las posiciones y velocidades de cada componente de la materia que compone el cosmos. Y con el advenimiento del concepto de campo en el siglo XIX, y su posterior aplicación a las fuerzas electromagnéticas y gravitacionales, esta visión se incrementó para incluir el valor de cada campo -la fuerza de cada campo, es decir- y la tasa de cambio del valor de cada campo, en cada lugar del espacio. Pero en la década de 1930, el principio de incertidumbre desmanteló esta concepción de la realidad al demostrar que no se puede saber nunca tanto la posición como la velocidad de una partícula; no se puede saber nunca tanto el valor de un campo en algún lugar del espacio como la rapidez con que cambia el valor del campo. La incertidumbre cuántica lo prohíbe.

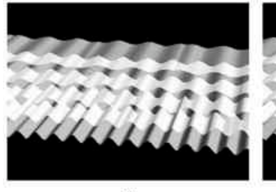
Como discutimos en el último capítulo, esta incertidumbre cuántica asegura que el micromundo es un reino turbulento y tembloroso. Anteriormente, nos centramos en los nervios cuánticos inducidos por la incertidumbre para el campo de inflado, pero la incertidumbre cuántica se aplica a todos los campos. El campo electromagnético, los campos de fuerza nuclear fuerte y débil, y el campo gravitacional están todos sujetos a frenéticos temblores cuánticos a escala microscópica. De hecho, estos temblores de campo existen incluso en el espacio que normalmente se consideraría vacío, espacio que parece no contener ni materia ni campos. Esta es una idea de importancia crítica, pero si no la has encontrado antes, es natural que te desconciertes. Si una región del espacio no contiene nada, si es un vacío, ¿no significa que no hay nada que temblar? Bueno, ya hemos aprendido que el concepto de la nada es sutil. Piense en el océano de Higgs que la teoría moderna afirma que impregna el espacio vacío. Los temblores cuánticos a los que me refiero ahora sólo sirven para hacer la noción de "nada" más sutil todavía. Esto es lo que quiero decir.

En la física precuántica (y pre-Higgs), declararíamos una región del espacio completamente vacía si no contuviera partículas y el valor de cada campo fuera uniformemente cero. [30] Pensemos ahora en esta noción clásica de vacío a la luz del principio de incertidumbre cuántica. Si un campo tuviera y mantuviera un valor de desaparición, conoceríamos su valor cero y también la tasa de cambio de su valor cero. Pero de acuerdo con el principio de incertidumbre, es imposible que estas dos propiedades sean definitivas. En cambio, si un campo tiene un valor definido en algún momento, cero en el caso que nos ocupa, el principio de incertidumbre nos dice que su tasa de cambio es completamente aleatoria. Y una tasa de cambio aleatoria significa que en momentos posteriores el valor del campo se

moverá aleatoriamente hacia arriba y hacia abajo, incluso en lo que normalmente pensamos que es un espacio completamente vacío. Así que la noción intuitiva de vacío, en la que todos los campos tienen y mantienen el valor cero, es incompatible con la mecánica cuántica.*El valor de un campo puede fluctuar* alrededor *del valor cero, pero no puede ser uniformemente cero en toda una región durante* más de un breve momento. [3] En el lenguaje técnico, los físicos dicen que los campos sufren *fluctuaciones de vacío.*

La naturaleza aleatoria de las fluctuaciones del campo de vacío asegura que en todas las regiones, excepto en la más microscópica, hay tantos nervios "hacia arriba" como "hacia abajo" y, por lo tanto, su promedio es cero, de la misma manera que una superficie de mármol parece perfectamente lisa a simple vista, aunque un microscopio electrónico revela que es dentada en escalas minúsculas. Sin embargo, aunque no podemos verlos directamente, hace más de medio siglo la realidad de los temblores de campo cuántico, incluso en el espacio vacío, se estableció de manera concluyente a través de un simple pero profundo descubrimiento.

En 1948, el físico holandés Hendrik Casimir descubrió cómo se podían detectar experimentalmente las fluctuaciones del vacío del campo electromagnético. La teoría cuántica dice que los temblores del campo electromagnético en el espacio vacío tomarán una variedad de formas, como se ilustra en la figura 12.1a. El avance de Casimir fue darse cuenta de que colocando dos placas metálicas ordinarias en una región por lo demás vacía, como en la figura 12.1b, podía inducir una sutil modificación de estos nervios del campo de vacío. A saber, las ecuaciones cuánticas muestran que en la región entre las placas habrá menos fluctuaciones (sólo se permiten aquellas fluctuaciones de campo electromagnético cuyos valores se desvanecen en la ubicación de cada placa). Casimir analizó las implicaciones de esta reducción de los temblores de campo y encontró algo extraordinario. De la misma manera que una reducción de la cantidad de aire en una región crea un desequilibrio de la presión (por ejemplo, a gran altitud se puede sentir que el aire más fino ejerce menos presión en el exterior de los tímpanos), la reducción de los nervios del campo cuántico entre las placas también produce un desequilibrio de la presión: los nervios del campo cuántico entre las placas se vuelven un poco más débiles que los del exterior de las placas, y este desequilibrio *hace que las placas* se acerquen entre sí.


(a)

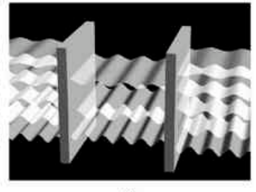

(b)

Figura 12.1 Fluctuaciones del vacío del campo electromagnético. entre dos placas metálicas y las que están fuera de las placas.

Piensa en lo completamente extraño que es esto. Colocas dos placas de metal simples, ordinarias y sin carga en una región vacía del espacio, una frente a la otra. Como sus masas son diminutas, la atracción gravitatoria entre ellas es tan pequeña que puede ser completamente ignorada. Como no hay nada más alrededor, naturalmente se concluye que las placas permanecerán en su sitio. Pero esto *no* es lo que los cálculos de Casimir predijeron que sucedería. Concluyó que las placas serían guiadas suavemente por el fantasmagórico agarre de las fluctuaciones cuánticas de vacío para moverse hacia el otro.

Cuando Casimir anunció por primera vez estos resultados teóricos, no existían equipos lo suficientemente sensibles para probar sus predicciones. Sin embargo, en el plazo de una década, otro físico holandés, Marcus Spaarnay, fue capaz de iniciar las primeras pruebas rudimentarias de esta *fuerza de Casimir,* y desde entonces se han llevado a cabo experimentos cada vez más precisos. En 1997, por ejemplo, Steve Lamoreaux, entonces en la Universidad de Washington, confirmó las predicciones de Casimir con una precisión del 5 por ciento. [4] (Para platos de aproximadamente el tamaño de las cartas de juego y colocados a una diez milésima de centímetro de distancia, la fuerza entre ellos es aproximadamente igual al peso de una sola lágrima; esto muestra lo difícil que es medir la fuerza de Casimir). Ahora hay pocas dudas de que la noción intuitiva del espacio vacío como una arena estática, tranquila y sin eventos está completamente fuera de lugar. Debido a la incertidumbre cuántica, el espacio vacío está lleno de actividad cuántica.

A los científicos les llevó la mayor parte del siglo XX desarrollar plenamente las matemáticas para describir tal actividad cuántica de las fuerzas electromagnéticas y nucleares fuertes y débiles. El esfuerzo fue bien empleado: los cálculos que utilizan este marco matemático concuerdan con los hallazgos experimentales con una precisión sin igual (por ejemplo, los cálculos del efecto de las fluctuaciones del vacío en las propiedades magnéticas de los electrones concuerdan con los resultados experimentales en una parte en mil millones).[5]

Sin embargo, a pesar de todo este éxito, durante muchas décadas los físicos han sido conscientes de que los nervios cuánticos han fomentado el descontento dentro de las leyes de la física.

Nervios y su descontento 6

Hasta ahora, sólo hemos discutido los nervios cuánticos de los campos que existen *en el* espacio. ¿Qué hay de los nervios cuánticos del espacio mismo? Aunque esto pueda sonar misterioso, en realidad es sólo otro ejemplo de

nerviosismo cuántico de campo, un ejemplo, sin embargo, que resulta particularmente problemático. En la teoría general de la relatividad, Einstein estableció que la fuerza gravitatoria puede describirse mediante deformaciones y curvas en el tejido del espacio; mostró que los campos gravitatorios se manifiestan a través de la forma o geometría del espacio (y del espacio tiempo, en general). Ahora, como cualquier otro campo, el campo gravitatorio está sujeto a nervios cuánticos: el principio de incertidumbre asegura que en escalas de distancia diminutas, el campo gravitatorio fluctúa hacia arriba y hacia abajo. Y como el campo gravitatorio es sinónimo de la forma del espacio, estos nervios cuánticos significan que la forma del espacio fluctúa aleatoriamente. De nuevo, como en todos los ejemplos de incertidumbre cuántica, en las escalas de distancia diarias los nervios son demasiado pequeños para ser percibidos directamente, y el entorno circundante parece suave, plácido y predecible. Pero cuanto más pequeña es la escala de observación, mayor es la incertidumbre, y más tumultuosas se vuelven las fluctuaciones cuánticas.

Esto se ilustra en la figura 12.2, en la que ampliamos secuencialmente el tejido del espacio para revelar su estructura a distancias cada vez más pequeñas. El nivel más bajo de la figura muestra las ondulaciones cuánticas del espacio en escalas familiares y, como se puede ver, no hay nada que ver: las ondulaciones son inobservablemente pequeñas, por lo que el espacio parece tranquilo y plano. Pero a medida que nos adentramos ampliando secuencialmente la región, vemos que las ondulaciones del espacio se vuelven cada vez más frenéticas. En el nivel más alto de la figura, que muestra el tejido del espacio en escalas más pequeñas que la longitud de *Planck* -una millonésima de una billonésima de una billonésima (10^{-33}) de centímetro- el espacio se convierte en un hervidero de fluctuaciones frenéticas. Como la ilustración lo deja claro, las nociones habituales de izquierda/derecha, atrás/adelante y arriba/abajo se vuelven tan confusas por el tumulto ultramicroscópico que pierden todo su significado. Incluso la noción habitual de antes/después, que hemos estado ilustrando mediante cortes secuenciales en el pan de espaciotiempo, pierde su significado por las fluctuaciones cuánticas en escalas temporales más cortas que el tiempo de *Planck,* alrededor de una décima de millonésima de una trillonésima de una trillonésima (10^{-43}) de segundo (que es aproximadamente el tiempo que tarda la luz en recorrer una longitud de Planck). Al igual que una fotografía borrosa, las ondulaciones salvajes de la figura 12.2 hacen que sea imposible distinguir sin ambigüedad un trozo de tiempo de otro cuando el intervalo de tiempo entre ellos se hace más corto que el tiempo de Planck. El resultado es que en escalas más cortas que las distancias y duraciones de Planck, la incertidumbre cuántica hace que el tejido del cosmos esté tan retorcido y distorsionado que las concepciones habituales de espacio y tiempo ya no son aplicables.



Figura 12.2 Sucesivos aumentos del espacio revelan que por debajo de la longitud de Planck, el espacio se vuelve irreconociblemente tumultuoso debido a los nervios cuánticos. (Estas son lupas imaginarias, cada una de las cuales aumenta entre 10 millones y 100 millones de veces.)

Si bien es exótica en detalle, la lección a grandes rasgos ilustrada en la figura 12.2 es una con la que ya estamos familiarizados: los conceptos y conclusiones relevantes en una escala pueden no ser aplicables en todas las escalas. Se trata de un principio clave en la física, y que encontramos repetidamente incluso en contextos mucho más prosaicos. Tome un vaso de agua. Describir el agua como un líquido suave y uniforme es útil y relevante en las escalas cotidianas, pero es una aproximación que se rompe si analizamos el agua con precisión sub-microscópica. En escalas diminutas, la imagen lisa da paso a un marco completamente diferente de moléculas y átomos ampliamente separados. De manera similar, la figura 12.2 muestra que la concepción de Einstein de un espacio y tiempo geométrico liso y suavemente curvado, aunque poderoso y preciso para describir el universo a grandes escalas, se rompe si analizamos el universo a escalas de distancia y tiempo extremadamente cortas. Los físicos creen que, al igual que con el agua, la representación suave del espacio y el tiempo es una aproximación que da lugar a otro marco más fundamental cuando se considera a escalas ultramicroscópicas. Lo que es ese marco -lo que constituye las "moléculas" y los "átomos" del espacio y el tiempo- es una cuestión que se está persiguiendo actualmente con gran vigor. Todavía no se ha resuelto.

Aún así, lo que queda completamente claro en la figura 12.2 es que a escalas diminutas el carácter suave del espacio y el tiempo previsto por la relatividad general se une al carácter frenético y tembloroso de la mecánica cuántica. El principio central de la relatividad general de Einstein, que el espacio y el tiempo forman una forma geométrica suavemente curvada, choca con el principio central de la mecánica cuántica, el principio de incertidumbre, que implica un entorno salvaje, tumultuoso y turbulento a la más pequeña de las escalas. El violento choque entre las ideas centrales de la relatividad general y la mecánica cuántica ha hecho que el entrelazamiento de ambas teorías sea uno de los desafíos más difíciles que los físicos han encontrado en los últimos ochenta años.

?

En la práctica, la incompatibilidad entre la relatividad general y la mecánica cuántica se manifiesta de manera muy específica. Si se utilizan las ecuaciones combinadas de la relatividad general y la mecánica cuántica, casi siempre dan una respuesta: el infinito. Y eso es un problema. Es una tontería. Los experimentadores nunca miden una cantidad infinita de nada. Las esferas nunca giran alrededor del infinito. Los medidores nunca llegan al infinito. Las calculadoras nunca registran el infinito. Casi siempre, una respuesta infinita no tiene sentido. Todo lo que nos dice es que las ecuaciones de la relatividad general y la mecánica cuántica, cuando se fusionan, se vuelven locas.

Obsérvese que esto es muy diferente de la tensión entre la relatividad especial y la mecánica cuántica que surgió en nuestra discusión de la no-localidad cuántica en el Capítulo 4. Allí encontramos que reconciliar los principios de la relatividad restringida (en particular, la simetría entre todos los observadores de velocidad constante) con el comportamiento de las partículas enmarañadas requiere una comprensión más completa del problema de la medición cuántica que la que se ha alcanzado hasta ahora (ver páginas 117-120). Pero este problema resuelto de forma incompleta no da lugar a inconsistencias matemáticas o a ecuaciones que den respuestas sin sentido. Por el contrario, las ecuaciones combinadas de la relatividad restringida y la mecánica cuántica se han utilizado para hacer las predicciones confirmadas con mayor precisión en la historia de la ciencia. La tranquila tensión entre la relatividad restringida y la mecánica cuántica apunta a un área que necesita un mayor desarrollo teórico, pero apenas tiene impacto en su poder de predicción combinado. No ocurre lo mismo con la explosiva unión entre la relatividad general y la mecánica cuántica, en la que se pierde todo el poder de predicción.

Sin embargo, todavía se puede preguntar si la incompatibilidad entre la relatividad general y la mecánica cuántica realmente importa. Claro, las ecuaciones combinadas pueden resultar en tonterías, pero ¿cuándo se necesita realmente usarlas juntas? Años de observaciones astronómicas han demostrado que la relatividad general describe el macro mundo de las estrellas, las galaxias, e incluso toda la extensión del cosmos con una precisión impresionante; décadas de experimentos han confirmado que la mecánica cuántica hace lo mismo para el micro mundo de las moléculas, los átomos y las partículas subatómicas. Ya que cada teoría hace maravillas en su propio dominio, ¿por qué preocuparse por combinarlas? ¿Por qué no mantenerlos separados? ¿Por qué no utilizar la relatividad general para las cosas que son grandes y masivas, la mecánica cuántica para las cosas que son diminutas y ligeras, y celebrar el impresionante logro de la humanidad de comprender con éxito una gama tan amplia de fenómenos físicos?

De hecho, esto *es* lo que la mayoría de los físicos han hecho desde los primeros decenios del siglo XX, y no se puede negar que ha sido un enfoque claramente fructífero. El progreso que la ciencia ha hecho trabajando en este marco desarticulado es impresionante. Sin embargo, hay varias razones por las que el antagonismo entre la relatividad general y la mecánica cuántica debe ser reconciliado. Aquí hay dos.

En primer lugar, a nivel visceral, es difícil creer que la comprensión más profunda del universo consiste en una unión incómoda entre dos poderosos marcos teóricos que son mutuamente incompatibles. No es que el universo venga equipado con una línea en la arena que separa las cosas que están correctamente descritas por la mecánica cuántica de las cosas correctamente descritas por la relatividad general. Dividir el universo en dos reinos separados parece tanto artificial como torpe. Para muchos, esto es una prueba de que debe haber una verdad más profunda y unificada que supere la brecha entre la relatividad general y la mecánica cuántica y que pueda aplicarse a *todo.* Tenemos un universo y por lo tanto, muchos creen firmemente, que deberíamos tener una teoría.

En segundo lugar, aunque la mayoría de las cosas son grandes y pesadas o pequeñas y ligeras, y por lo tanto, como cuestión práctica, pueden ser descritas usando la relatividad general *o* la mecánica cuántica, esto no es cierto para todas las cosas. Los agujeros negros son un buen ejemplo. De acuerdo con la relatividad general, toda la materia que compone un agujero negro es aplastada en un único punto minúsculo en el centro del agujero negro. [7] Esto hace que el centro de un agujero negro sea enormemente masivo e increíblemente pequeño, y por lo tanto cae a ambos lados de la supuesta división: necesitamos usar la relatividad general porque la gran masa crea un campo gravitatorio sustancial, y también necesitamos usar la mecánica cuántica porque toda la masa está comprimida hasta un tamaño minúsculo. Pero en combinación, las ecuaciones se rompen, así que nadie ha sido capaz de determinar lo que sucede justo en el centro de un agujero negro.

Es un buen ejemplo, pero si eres un verdadero escéptico, podrías preguntarte si esto es algo que debería mantener a alguien despierto por la noche. Dado que no podemos ver el interior de un agujero negro a menos que saltemos, y, además, si saltamos no seríamos capaces de informar de nuestras observaciones al mundo exterior, nuestra comprensión incompleta del interior del agujero negro puede no parecerle particularmente preocupante. Para los físicos, sin embargo, la existencia de un reino en el que las conocidas leyes de la física se rompen, no importa lo esotérico que el reino pueda parecer, da lugar a banderas rojas. Si las leyes conocidas de la física se rompen bajo cualquier circunstancia, es una clara señal de que no hemos alcanzado la comprensión más profunda posible. Después de todo, el universo funciona; hasta donde podemos decir, el universo no se rompe. La teoría correcta del universo debería, como mínimo, cumplir con el mismo estándar.

Bueno, eso parece razonable. Pero para mí, la urgencia del conflicto entre la relatividad general y la mecánica cuántica se revela sólo a través de otro ejemplo. Mire la figura 10.6. Como puede ver, hemos hecho grandes progresos en la construcción de una historia consistente y predictiva de la evolución cósmica, pero el cuadro sigue siendo incompleto debido a la borrosa mancha cerca del inicio del universo. Y dentro de la neblina de esos primeros momentos se encuentra la comprensión del más tentador de los misterios: el origen y la naturaleza fundamental del espacio y el tiempo. Entonces, ¿qué nos ha impedido penetrar en la niebla? La culpa recae directamente en el conflicto entre la relatividad general y la mecánica cuántica. El antagonismo entre las leyes de lo grande y las de lo pequeño es la razón por la que la mancha borrosa permanece oscura y todavía no tenemos una idea de lo que ocurrió en el comienzo mismo del universo.

Para entender por qué, imagínese, como en el capítulo 10, correr una película del cosmos en expansión en reversa, dirigiéndose hacia el big bang. Al revés, todo lo que ahora se está separando se junta, y así, a medida que pasamos la película más atrás, el universo se hace cada vez más pequeño, más caliente y más denso. A medida que nos acercamos al tiempo cero, *todo el universo* observable se comprime hasta el tamaño del sol, luego se comprime más hasta el tamaño de la tierra, luego se aplasta hasta el tamaño de una bola de bolos, un guisante, un grano de arena... Cada vez más pequeño, el universo se encoge a medida que la película se rebobina hacia sus fotogramas iniciales. Llega un momento en esta película de marcha atrás cuando todo el universo conocido tiene un tamaño cercano a la longitud de Planck - la millonésima de una billonésima de una billonésima de un centímetro en la que la relatividad general y la mecánica cuántica se encuentran en desacuerdo. En este momento, toda la masa y la energía responsable de la creación del universo observable está contenida en una mota que es menos de una centésima de una billonésima de una billonésima del tamaño de un solo átomo.[8]

Así, como en el caso del centro de un agujero negro, el universo temprano cae a ambos lados de la división: La enorme densidad del universo temprano requiere el uso de la relatividad general. El diminuto tamaño del universo temprano requiere el uso de la mecánica cuántica. Pero una vez más, en combinación las leyes se rompen. El proyector se atasca, la película cósmica se quema, y no podemos acceder a los primeros momentos del universo. Debido al conflicto entre la relatividad general y la mecánica cuántica, seguimos ignorando lo que ocurrió al principio y nos vemos reducidos a dibujar un parche borroso en la figura 10.6.

Si alguna vez esperamos entender el origen del universo -una de las cuestiones más profundas de toda la ciencia- el conflicto entre la relatividad general y la mecánica cuántica *debe* ser resuelto. Debemos resolver las diferencias entre las leyes de los grandes y las leyes de los pequeños y fusionarlas en una única teoría armoniosa.

El improbable camino hacia una solución31

Como ejemplifica el trabajo de Newton y Einstein, los avances científicos a veces nacen del asombroso genio de un solo científico, puro y simple. Pero eso es raro. Mucho más frecuentemente, los grandes avances representan el esfuerzo colectivo de muchos científicos, cada uno construyendo sobre las ideas de los demás para lograr lo que ningún individuo podría haber logrado de forma aislada. Un científico puede contribuir con una idea que haga pensar a un colega, lo que lleva a una observación que revela una relación inesperada que inspira un avance importante, que inicia de nuevo el ciclo del descubrimiento. Amplios conocimientos, facilidad técnica, flexibilidad de pensamiento, apertura a conexiones imprevistas, inmersión en el libre flujo de ideas en todo el mundo, trabajo duro y una suerte significativa son todas partes críticas del descubrimiento científico. En los últimos tiempos, quizás no haya ningún gran avance que ejemplifique mejor esto que el desarrollo de la teoría de las supercuerdas*.*

La teoría de las supercuerdas es un enfoque que muchos científicos creen que combina con éxito la relatividad general y la mecánica cuántica. Y como veremos, hay razones para esperar aún más. Aunque todavía es un trabajo en progreso, la teoría de las supercuerdas puede ser una teoría completamente unificada de todas las fuerzas y toda la materia, una teoría que alcanza el sueño de Einstein y más allá, una teoría, que yo y muchos otros creemos, que está marcando el comienzo de un camino que un día nos llevará a las leyes más profundas del universo. Sin embargo, la verdad es que la teoría de las supercuerdas no fue concebida como un medio ingenioso para alcanzar estas nobles y antiguas metas. En cambio, la historia de la teoría de las supercuerdas está llena de descubrimientos accidentales, falsos comienzos, oportunidades perdidas y carreras casi arruinadas. También es, en un sentido preciso, la historia del descubrimiento de la solución correcta para el problema equivocado.

En 1968, Gabriele Veneziano, un joven investigador postdoctoral que trabajaba en el CERN, fue uno de los muchos físicos que trataron de comprender la fuerte fuerza nuclear estudiando los resultados de las colisiones de partículas de alta energía producidas en los rompedores de átomos de todo el mundo. Después de meses de analizar los patrones y las regularidades de los datos, Veneziano reconoció una sorprendente e inesperada conexión con un área esotérica de las matemáticas. Se dio cuenta de que una fórmula de doscientos años de antigüedad descubierta por el famoso matemático suizo Leonhard Euler (la*función beta de Euler*) parecía coincidir con los datos sobre la fuerza nuclear fuerte con precisión. Si bien esto podría no parecer particularmente inusual -los físicos teóricos se ocupan de fórmulas arcanas todo el tiempo- era un caso sorprendente de la carreta que rodaba kilómetros por delante del caballo. La mayoría de las veces, los físicos primero desarrollan una intuición, una imagen mental, una amplia comprensión de los principios físicos subyacentes a lo que están estudiando y sólo entonces buscan las ecuaciones necesarias para fundamentar su intuición en

matemáticas rigurosas. Veneziano, por el contrario, saltó directamente a la ecuación; su brillantez consistió en reconocer patrones inusuales en los datos y en establecer el vínculo imprevisto con una fórmula ideada siglos antes por interés puramente matemático.

Pero aunque Veneziano tenía la fórmula a mano, no tenía explicación de *por qué funcionaba*. Carecía de una imagen física de por qué la función beta de Euler debería ser relevante para las partículas que se influyen mutuamente a través de la fuerza nuclear fuerte. En dos años la situación cambió completamente. En 1970, los trabajos de Leonard Susskind de Stanford, Holger Nielsen del Instituto Niels Bohr, y Yoichiro Nambu de la Universidad de Chicago revelaron los fundamentos físicos del descubrimiento de Veneziano. Estos físicos mostraron que si la fuerte fuerza entre dos partículas se debía a una diminuta, extremadamente delgada, casi como una banda de goma que conectaba las partículas, entonces los procesos cuánticos que Veneziano y otros habían estado estudiando se describirían matemáticamente usando la fórmula de Euler. Los pequeños filamentos elásticos fueron bautizados como *cuerdas* y ahora, con el caballo adecuadamente antes del carro, la teoría de las cuerdas nació oficialmente.

Pero mantén el burbujeo. Para los involucrados en esta investigación, fue gratificante entender el origen físico de la perspicacia de Veneziano, ya que sugería que los físicos estaban en camino de desenmascarar la fuerte fuerza nuclear. Sin embargo, el descubrimiento no fue recibido con un entusiasmo universal, ni mucho menos. Muy lejos. De hecho, el artículo de Susskind fue devuelto por la revista a la que lo presentó con el comentario de que el trabajo era de mínimo interés, una evaluación que Susskind recuerda bien: "Me quedé aturdido, me tiraron de la silla, estaba deprimido, así que me fui a casa y me emborraché".[9] Finalmente, su trabajo y los otros que anunciaban el concepto de la cuerda fueron todos publicados, pero no pasó mucho tiempo antes de que la teoría sufriera dos reveses más devastadores. Un examen minucioso de los datos más refinados sobre la fuerza nuclear fuerte, recogidos a principios de los años 70, mostró que el enfoque de cuerdas no describía con precisión los resultados más recientes. Además, una nueva propuesta llamada *cromodinámica cuántica,* que estaba firmemente arraigada en los ingredientes tradicionales de las partículas y los campos -sin cuerdas en absoluto- *fue capaz* de describir todos los datos de manera convincente. Y así, para 1974, la teoría de cuerdas había recibido un golpe de gracia de uno-dos. O eso parecía.

John Schwarz fue uno de los primeros entusiastas de las cuerdas. Una vez me dijo que desde el principio, tuvo la sensación de que la teoría era profunda e importante. Schwarz pasó varios años analizando sus diversos aspectos matemáticos; entre otras cosas, esto llevó al descubrimiento de la teoría de las *súper cuerdas,* como veremos, un importante refinamiento de la propuesta original de las cuerdas. Pero con el auge de la cromodinámica cuántica y el fracaso de la estructura de las cuerdas para describir la fuerza fuerte, la justificación para

continuar trabajando en la teoría de las cuerdas comenzó a agotarse. Sin embargo, había un desajuste particular entre la teoría de las cuerdas y la fuerza nuclear fuerte que seguía molestando a Schwarz, y descubrió que no podía dejarlo pasar. Las ecuaciones mecánicas cuánticas de la teoría de las cuerdas predecían que una partícula particular, bastante inusual, debía ser producida copiosamente en las colisiones de alta energía que se producían en los choques de los átomos. La partícula tendría masa cero, como un fotón, pero la teoría de cuerdas predijo que tendría un giro de *dos, lo que significa*, en términos generales, que giraría *dos veces* más rápido que un fotón. Ninguno de los experimentos había encontrado nunca tal partícula, así que esto parecía estar entre las predicciones erróneas de la teoría de cuerdas.

Schwarz y su colaborador Joël Scherk se desconcertaron por este caso de una partícula perdida, hasta que en un magnífico salto hicieron una conexión con un problema completamente diferente. Aunque nadie había sido capaz de combinar la relatividad general y la mecánica cuántica, los físicos habían determinado ciertas características que surgirían de cualquier unión exitosa. Y, como se indica en el capítulo 9, una de las características que encontraron fue que, al igual que la fuerza electromagnética se transmite microscópicamente por los fotones, la fuerza gravitatoria debería ser transmitida microscópicamente por otra clase de partículas, los gravitones (los más elementales, los haces de gravedad cuántica). Aunque los gravitones aún no han sido detectados experimentalmente, todos los análisis teóricos coinciden en que los gravitones deben tener dos propiedades: no deben tener masa y deben tener el espín dos. Para Schwarz y Scherk esto sonó una fuerte campana -estas eran sólo las propiedades de la partícula pícara predichas por la teoría de cuerdas- y les inspiró a hacer un movimiento audaz, uno que transformaría un fallo de la teoría de cuerdas en un éxito sorprendente.

Propusieron que la teoría de las cuerdas no debería ser pensada como una teoría mecánica cuántica de la fuerza nuclear fuerte. Argumentaron que aunque la teoría había sido descubierta en un intento de comprender la fuerza fuerte, en realidad era la solución a un problema diferente. En realidad fue la primera teoría de la mecánica cuántica de la fuerza gravitatoria. Afirmaban que la partícula de spin-dos sin masa predicha por la teoría de cuerdas era el gravitón, y que las ecuaciones de la teoría de cuerdas incorporaban necesariamente una descripción de la mecánica cuántica de la gravedad.

Schwarz y Scherk publicaron su propuesta en 1974 y esperaban una gran reacción de la comunidad física. En cambio, su trabajo fue ignorado. En retrospectiva, no es difícil entender por qué. A algunos les pareció que el concepto de la cuerda se había convertido en una teoría en busca de una aplicación. Después de que el intento de utilizar la teoría de las cuerdas para explicar la fuerte fuerza nuclear fracasara, parecía que sus proponentes no aceptarían la derrota y, en cambio, estaban decididos a encontrar relevancia para la teoría en otros lugares. Se añadió combustible al fuego de este punto de vista cuando quedó

claro que Schwarz y Scherk necesitaban cambiar radicalmente el tamaño de las cuerdas de su teoría para que la fuerza transmitida por los gravitones candidatos tuviera la conocida y familiar fuerza de gravedad. Dado que la gravedad es una fuerza extremadamente débil y dado que, resulta que cuanto más larga es la cuerda, más *fuerte es la fuerza* transmitida, Schwarz y Scherk descubrieron que las cuerdas tenían que ser extremadamente pequeñas para transmitir una fuerza con la débil fuerza de la gravedad; tenían que tener aproximadamente la longitud de Planck en tamaño, cien mil millones de billones de veces más pequeñas de lo que se había previsto anteriormente. Tan pequeñas, señalaron irónicamente los escépticos, que no había ningún equipo que pudiera verlas, lo que significaba que la teoría no podía ser probada experimentalmente. [10]

Por el contrario, los años 70 fueron testigos de un éxito tras otro para las teorías más convencionales, no basadas en cuerdas, formuladas con partículas puntuales y campos. Tanto los teóricos como los experimentadores tenían la cabeza y las manos llenas de ideas concretas que investigar y predicciones que probar. ¿Por qué recurrir a la teoría de cuerdas especulativa cuando había tanto trabajo emocionante que hacer dentro de un marco de trabajo probado y verdadero? En gran medida en la misma línea, aunque los físicos sabían en el fondo de sus mentes que el problema de la fusión de la gravedad y la mecánica cuántica seguía sin resolverse con los métodos convencionales, no era un problema que llamara la atención. Casi todo el mundo reconocía que era una cuestión importante y que tendría que ser abordada algún día, pero con la gran cantidad de trabajo que quedaba por hacer sobre las fuerzas no gravitatorias, el problema de la cuantificación de la gravedad fue empujado a un segundo plano apenas ardiente. Y, finalmente, a mediados y finales de los 70, la teoría de cuerdas estaba lejos de haber sido completamente resuelta. Contener un candidato para el gravitón fue un éxito, pero aún quedaban muchos problemas conceptuales y técnicos por resolver. Parecía totalmente plausible que la teoría no pudiera superar una o más de estas cuestiones, así que trabajar en la teoría de cuerdas significaba correr un riesgo considerable. Dentro de unos pocos años, la teoría podría estar muerta.

Schwarz se mantuvo firme. Creía que el descubrimiento de la teoría de las cuerdas, el primer enfoque plausible para describir la gravedad en el lenguaje de la mecánica cuántica, era un gran avance. Si nadie quería escuchar, bien. Él seguiría adelante y desarrollaría la teoría, de modo que cuando la gente estuviera lista para prestar atención, la teoría de las cuerdas estaría mucho más avanzada. Su determinación demostró ser previsora.

A finales de los años 70 y principios de los 80, Schwarz se asoció con Michael Green, entonces del Queen Mary College de Londres, y se puso a trabajar en algunos de los obstáculos técnicos que enfrentaba la teoría de las cuerdas. El principal de ellos era el problema de las anomalías. Los detalles no son esenciales, pero, en términos generales, una anomalía es un efecto cuántico pernicioso que condena a una teoría a la ruina al implicar que viola ciertos

principios sagrados, como la conservación de la energía. Para ser viable, una teoría debe estar libre de todas las anomalías. Las investigaciones iniciales habían revelado que la teoría de cuerdas estaba plagada de anomalías, lo cual era una de las principales razones técnicas por las que no había generado mucho entusiasmo. Las anomalías significaban que, aunque la teoría de las cuerdas parecía proporcionar una teoría cuántica de la gravedad, ya que contenía gravitones, al examinarla más de cerca la teoría sufría sus propias inconsistencias matemáticas sutiles.

Sin embargo, Schwarz se dio cuenta de que la situación no estaba clara. Había una posibilidad, muy remota, de que un cálculo completo revelara que las diversas contribuciones cuánticas a las anomalías que afligían a la teoría de cuerdas, cuando se combinaban correctamente, se anulaban entre sí. Junto con Green, Schwarz emprendió la ardua tarea de calcular estas anomalías, y para el verano de 1984 los dos dieron en el blanco. Una noche de tormenta, mientras trabajaban hasta tarde en el Centro de Física de Aspen en Colorado, completaron uno de los cálculos más importantes del campo, un cálculo que probaba que todas las anomalías potenciales, de una manera que parecía casi milagrosa, *se anulaban entre sí*. La teoría de cuerdas, revelaron, estaba libre de anomalías y por lo tanto no sufría de inconsistencias matemáticas. La teoría de cuerdas, demostraron convincentemente, era mecánicamente cuántica viable.

Esta vez los físicos escucharon. Era la mitad de los 80, y el clima en la física había cambiado considerablemente. Muchos de los rasgos esenciales de las tres fuerzas no gravitacionales habían sido elaborados teóricamente y confirmados experimentalmente. Aunque algunos detalles importantes seguían sin resolverse -y algunos todavía lo hacen- la comunidad estaba preparada para abordar el siguiente gran problema: la fusión de la relatividad general y la mecánica cuántica. Entonces, desde un rincón poco conocido de la física, Green y Schwarz irrumpieron en escena con una propuesta definitiva, matemáticamente consistente y estéticamente agradable sobre cómo proceder. Casi de la noche a la mañana, el número de investigadores que trabajaban en la teoría de cuerdas saltó de dos a más de mil. La primera revolución de las cuerdas estaba en marcha.

La primera revolución

Comencé la escuela de postgrado en la Universidad de Oxford en el otoño de 1984, y en pocos meses los pasillos estaban llenos de charlas sobre una revolución en la física. Como Internet aún no se había utilizado ampliamente, los rumores eran un canal dominante para la rápida difusión de la información, y cada día se hablaba de nuevos avances. Investigadores de todas partes comentaron que la atmósfera estaba cargada de una manera nunca vista desde los primeros

días de la mecánica cuántica, y se hablaba seriamente de que el fin de la física teórica estaba al alcance de la mano.

La teoría de las cuerdas era nueva para casi todo el mundo, así que en aquellos primeros días sus detalles no eran de conocimiento común. Fuimos particularmente afortunados en Oxford: Michael Green había visitado recientemente para dar una conferencia sobre la teoría de las cuerdas, así que muchos de nosotros nos familiarizamos con las ideas básicas de la teoría y sus afirmaciones esenciales. Y eran afirmaciones impresionantes. En resumen, esto es lo que la teoría decía:

Tome cualquier pedazo de materia -un bloque de hielo, un trozo de roca, una plancha de hierro- e imagínese que lo corta por la mitad, y luego corta uno de los trozos por la mitad nuevamente, y así sucesivamente; imagínese que corta continuamente el material en trozos cada vez más pequeños. Hace unos 2.500 años, los antiguos griegos se plantearon el problema de determinar el ingrediente más fino, indivisible e indivisible que sería el producto final de tal procedimiento. En nuestra época hemos aprendido que tarde o temprano se llega a los átomos, pero los átomos no son la respuesta a la pregunta de los griegos, porque pueden ser cortados en componentes más finos. Los átomos pueden ser divididos. Hemos aprendido que consisten en electrones que pululan alrededor de un núcleo central que está compuesto de partículas aún más finas - protones y neutrones. Y a finales de la década de 1960, los experimentos realizados en el Acelerador Lineal de Stanford revelaron que incluso los propios neutrones y protones están compuestos de constituyentes más fundamentales: cada protón y cada neutrón está formado por tres partículas conocidas como quarks, como se menciona en el capítulo 9 y se ilustra en la figura 12.3a.

La teoría convencional, apoyada por experimentos de última generación, prevé que los electrones y los quarks son puntos sin ninguna extensión espacial; en esta visión, por lo tanto, marcan el final de la línea, los últimos muñecos matrioskas de la naturaleza que se encuentran en la composición microscópica de la materia.



Figura 12.3 La teoría convencional se basa en los electrones y los quarks como constituyentes básicos de la materia. La teoría de las cuerdas sugiere que cada partícula es en realidad una cuerda vibrante.

Aquí es donde la teoría de cuerdas hace su aparición. La teoría de las cuerdas desafía el cuadro convencional al proponer que los electrones y los quarks *no* son partículas de tamaño cero. En su lugar, el modelo convencional de partículas

como puntos, según la teoría de las cuerdas, es una aproximación a una representación más refinada en la que cada partícula es en realidad un diminuto filamento vibrante de energía, llamado , como se puede ver en la Figura 12.3b. Estos filamentos de energía vibratoria se prevé que no tengan espesor, sólo longitud, por lo que las cuerdas son entidades unidimensionales.

Sin embargo, debido a que las cuerdas son tan pequeñas, unos cientos de miles de millones de veces más pequeñas que un solo núcleo atómico (10^{-33} centímetros), parecen ser puntos incluso cuando se examinan con nuestros más avanzados rompedores de átomos.

Debido a que nuestra comprensión de la teoría de las cuerdas está lejos de ser completa, nadie sabe con seguridad si la historia termina aquí - si, suponiendo que la teoría es correcta, las cuerdas son realmente la última muñeca rusa, o si las propias cuerdas podrían estar compuestas de ingredientes aún más finos. Volveremos sobre este tema, pero por ahora seguimos el desarrollo histórico del tema e imaginamos que las cuerdas son realmente donde se detiene la pelota; imaginamos que las cuerdas son *el* ingrediente más elemental del universo.

Teoría de Cuerdas y Unificación

Esa es la teoría de las cuerdas en resumen, pero para transmitir el poder de este nuevo enfoque, tengo que describir la física de partículas convencional un poco más completamente. Durante los últimos cien años, los físicos han empujado, golpeado y pulverizado la materia en busca de los componentes elementales del universo. Y, de hecho, han encontrado que en casi todo lo que alguien ha encontrado, los ingredientes fundamentales son los electrones y quarks que acabamos de mencionar - más precisamente, como en el capítulo 9, los electrones y dos tipos de quarks, up-quarks y down-quarks, que difieren en masa y en carga eléctrica. Pero los experimentos también revelaron que el universo tiene otras especies de partículas más exóticas que no surgen en la materia ordinaria. Además de los up-quarks y down-quarks, los experimentadores han identificado otras cuatro especies de quarks (*charm-quarks, strange-quarks, bottom-quarks* y *top-quarks*) y otras dos especies de partículas que son muy parecidas a los electrones, sólo que más pesadas (*muons* y *taus*). Es probable que estas partículas fueran abundantes justo después del big bang, pero hoy en día se producen sólo como restos efímeros de colisiones de alta energía entre las especies de partículas más familiares. Finalmente, los experimentadores también han descubierto tres especies de partículas fantasmagóricas llamadas *neutrinos* (*electron-neutrinos, muon-neutrinos* y *tau-neutrinos*) que pueden atravesar trillones de kilómetros de plomo tan fácilmente como nosotros atravesamos el aire. Estas partículas -el electrón y sus dos primos más pesados, los seis tipos de quarks y los tres tipos de neutrinos- constituyen la respuesta de un físico de partículas moderno a la pregunta de los antiguos griegos sobre la composición de la materia.[11]

La lista de lavado de las especies de partículas puede organizarse en tres "familias" o "generaciones" de partículas, como en la tabla 12.1. Cada familia tiene dos de los quarks, uno de los neutrinos y una de las partículas parecidas a los

electrones; la única diferencia entre las partículas correspondientes de cada familia es que sus masas aumentan en cada familia sucesiva. La división en familias sugiere ciertamente un patrón subyacente, pero el aluvión de partículas puede fácilmente hacer que la cabeza dé vueltas (o, peor aún, que los ojos se vuelvan vidriosos). Espera, sin embargo, porque una de las características más bellas de la teoría de las cuerdas es que proporciona un medio para domar esta aparente complejidad.

Según la teoría de las cuerdas, sólo hay *un* ingrediente fundamental, la cuerda, y la riqueza de especies de partículas refleja simplemente los diferentes patrones vibratorios que una cuerda puede ejecutar. Es como lo que sucede con las cuerdas más familiares como las de un violín o un violonchelo. Una cuerda de violonchelo puede vibrar de muchas maneras diferentes, y escuchamos cada patrón como una nota musical diferente. De esta manera, una cuerda de violonchelo puede producir una gama de diferentes sonidos. Las cuerdas en la teoría de cuerdas se comportan de manera similar: también pueden vibrar en diferentes patrones. Pero en lugar de producir diferentes tonos musicales, *los diferentes patrones de vibración en la teoría de las cuerdas corresponden a diferentes tipos de partículas.* La clave es que el detallado patrón de vibración ejecutado por una cuerda produce una masa específica, una carga eléctrica específica, un giro específico, y así sucesivamente, la lista específica de propiedades, es decir, que distinguen un tipo de partícula de otra. Una cuerda que vibra en un patrón particular podría tener las propiedades de un electrón, mientras que una cuerda que vibra en un patrón diferente podría tener las propiedades de un up-quark, un down-quark o cualquiera de las otras especies de partículas de la Tabla 12.1 **.** No es que una "cuerda de electrones" constituya un electrón, o una "cuerda de up-quark" constituya un up-quark, o una "cuerda de down-quark" constituya un down-quark. En cambio, la *única* especie de cuerda puede dar cuenta de una gran variedad de partículas porque la cuerda puede ejecutar una gran variedad de patrones de vibración.

Family 1		Family 2		Family 3	
Particle	Mass	Particle	Mass	Particle	Mass
Electron	.00054	Muon	.11	Tau	1.9
Electron-neutrino	$<10^{-9}$	Muon-neutrino	$<10^{-4}$	Tau-neutrino	$<10^{-3}$
Up-quark	.0047	Charm-quark	1.6	Top-quark	189
Down-quark	.0074	Strange-quark	.16	Bottom-quark	5.2

Tabla 12.1 Las tres familias de partículas fundamentales y sus masas (en múltiplos de la masa del protón). Se sabe que los valores de las masas de los neutrinos son distintos de cero, pero sus valores exactos han eludido hasta ahora la determinación experimental.

Como pueden ver, esto representa un paso potencialmente gigante hacia la unificación. Si la teoría de las cuerdas es correcta, la lista de partículas de la Tabla

12.1, que gira sobre sí misma, manifiesta el repertorio vibratorio de un único ingrediente básico. Metafóricamente, las diferentes notas que pueden ser tocadas por una sola especie de cuerda darían cuenta de todas las diferentes partículas que han sido detectadas. A nivel ultramicroscópico, el universo sería similar a una sinfonía de cuerdas que hace vibrar la materia hasta su existencia.

Este es un marco deliciosamente elegante para explicar las partículas de la Tabla 12.1, pero la unificación propuesta por la teoría de cuerdas va aún más lejos. En el capítulo 9 y en nuestra discusión anterior, discutimos cómo las fuerzas de la naturaleza son transmitidas a nivel cuántico por otras partículas, las partículas mensajeras, que se resumen en la Tabla 12.2 **.** La teoría de cuerdas explica las partículas mensajeras exactamente como explica las partículas de la materia. Es decir, cada partícula mensajera es una cuerda que ejecuta un patrón de vibración particular. Un fotón es una cuerda que vibra en un patrón particular, una partícula W es una cuerda que vibra en un patrón diferente, un gluón es una cuerda que vibra en otro patrón. Y, lo más importante, lo que Schwarz y Scherk mostraron en 1974 es que hay un patrón vibratorio particular que tiene todas las propiedades de un gravitón, de modo que la fuerza gravitatoria está incluida en el marco de la mecánica cuántica de la teoría de cuerdas. Por lo tanto, no sólo las partículas de materia surgen de las cuerdas vibratorias, sino que también lo hacen las partículas mensajeras, incluso la partícula mensajera de la gravedad.

Force	Force particle	Mass
Strong	Gluon	0
Electromagnetic	Photon	0
Weak	W, Z	86, 97
Gravity	Graviton	0

Tabla 12.2 Las cuatro fuerzas de la naturaleza, junto con sus partículas de fuerza asociadas y sus masas en múltiplos de la masa del protón. (En realidad hay dos partículas W, una con carga +1 y otra con carga -1, que tienen la misma masa; por simplicidad ignoramos este detalle y nos referimos a cada una como una partícula W.

Y así, más allá de proporcionar el primer enfoque exitoso para fusionar la gravedad y la mecánica cuántica, la teoría de cuerdas reveló su capacidad para proporcionar una descripción unificada de toda la materia y todas las fuerzas. Esa es la afirmación que hizo caer a miles de físicos de sus sillas a mediados de la década de 1980; para cuando se levantaron y se desempolvaron, muchos eran conversos.

¿Por qué funciona la teoría de las cuerdas?

Antes del desarrollo de la teoría de cuerdas, el camino del progreso científico estaba sembrado de intentos fallidos de fusionar la gravedad y la mecánica cuántica. Entonces, ¿qué es lo que ha permitido a la teoría de las cuerdas tener éxito hasta ahora? Hemos descrito cómo Schwarz y Scherk se dieron cuenta, para su sorpresa, de que un patrón vibratorio de cuerdas en particular tenía las propiedades adecuadas para ser la partícula de gravitón, y cómo llegaron a la conclusión de que la teoría de las cuerdas proporcionaba un marco preparado para fusionar ambas teorías. Históricamente, así es como se realizó fortuitamente el poder y la promesa de la teoría de las cuerdas, pero como explicación de por qué el enfoque de las cuerdas tuvo éxito donde todos los demás intentos fracasaron, nos deja con las ganas. La figura 12.2 resume el conflicto entre la relatividad general y la mecánica cuántica - en escalas de distancia (y tiempo) ultracorto, el frenesí de la incertidumbre cuántica se vuelve tan violento que el suave modelo geométrico del espacio tiempo que subyace a la relatividad general se destruye - por lo que la pregunta es, ¿cómo resuelve el problema la teoría de cuerdas? ¿Cómo calma la teoría de cuerdas las tumultuosas fluctuaciones del espacio tiempo a distancias ultramicroscópicas?

La principal novedad de la teoría de las cuerdas es que su ingrediente básico no es una partícula puntual -un punto sin tamaño- sino un objeto que tiene una extensión espacial. Esta diferencia es la clave del éxito de la teoría de las cuerdas en la fusión de la gravedad y la mecánica cuántica.

El frenesí desenfrenado que se muestra en la figura 12.2 surge de la aplicación del principio de incertidumbre al campo gravitatorio; a escalas cada vez más pequeñas, el principio de incertidumbre implica que las fluctuaciones del campo gravitatorio son cada vez mayores. Sin embargo, a escalas de distancia tan extremadamente pequeñas, deberíamos describir el campo gravitatorio en términos de sus constituyentes fundamentales, los gravitones, de la misma manera que a escalas moleculares deberíamos describir el agua en términos de moléculas de H_2O. En este lenguaje, las frenéticas ondulaciones del campo gravitatorio deberían ser pensadas como un gran número de gravitones revoloteando salvajemente de aquí para allá, como trozos de suciedad y polvo atrapados en un feroz tornado. Ahora bien, si los gravitones fueran partículas puntuales (como se previó en todos los intentos fallidos de fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica), la figura 12.2 reflejaría con precisión su comportamiento colectivo: escalas de distancia cada vez más cortas, agitación cada vez mayor. Pero la teoría de cuerdas cambia esta conclusión.

En la teoría de las cuerdas, cada gravitón es una cuerda vibrante, algo que no es un punto, sino que tiene un tamaño aproximado de $10^{\text{a 33 centímetros}}$. [12] Y como los gravitones son los componentes más finos y elementales de un campo gravitatorio, no tiene sentido hablar del comportamiento de los campos gravitatorios en escalas de longitudes sub-Planck. Al igual que la resolución en la pantalla de su TV está limitada por el tamaño de los píxeles individuales, la

resolución del campo gravitatorio en la teoría de cuerdas está limitada por el tamaño de los gravitones. Así, el tamaño no nulo de los gravitones (y de todo lo demás) en la teoría de cuerdas establece un límite, aproximadamente a la escala de Planck, de lo fino que puede resolverse un campo gravitatorio.

Esa es la realización vital. Las incontrolables fluctuaciones cuánticas que se ilustran en la figura 12.2 surgen sólo cuando consideramos la incertidumbre cuántica en escalas de distancias arbitrariamente cortas -escalas más cortas que la longitud de Planck-. En una teoría basada en partículas de tamaño cero, tal aplicación del principio de incertidumbre está justificada y, como vemos en la figura, esto nos lleva a un terreno salvaje más allá del alcance de la relatividad general de Einstein. Una teoría basada en cuerdas, sin embargo, incluye un mecanismo de seguridad incorporado. En la teoría de las cuerdas, las cuerdas son el ingrediente más pequeño, así que nuestro viaje hacia lo ultramicroscópico llega a su fin cuando alcanzamos la longitud de Planck, el tamaño de las propias cuerdas. En la figura 12.2, la escala de Planck está representada por el segundo nivel más alto; como se puede ver, en tales escalas todavía hay ondulaciones en el tejido espacial porque el campo gravitatorio todavía está sujeto a los nervios cuánticos. Pero los temblores son lo suficientemente leves como para evitar un conflicto irreparable con la relatividad general. Las matemáticas precisas que subyacen a la relatividad general deben modificarse para incorporar estas ondulaciones cuánticas, pero esto puede hacerse y las matemáticas siguen siendo sensatas.

Así, al limitar lo pequeño que puede llegar a ser, la teoría de cuerdas limita lo violentos que se vuelven los nervios del campo gravitatorio, y el límite es lo suficientemente grande como para evitar el catastrófico choque entre la mecánica cuántica y la relatividad general. De esta manera, la teoría de cuerdas sofoca el antagonismo entre los dos marcos y es capaz, por primera vez, de unirlos.

El tejido cósmico en el reino de lo pequeño

¿Qué significa esto para la naturaleza ultramicroscópica del espacio y del espacio tiempo en general? Por un lado, desafía enérgicamente la noción convencional de que el tejido del espacio y el tiempo es continuo, que siempre se puede dividir la distancia entre aquí y allá o la duración entre ahora y entonces por la mitad y otra vez por la mitad, dividiendo interminablemente el espacio y el tiempo en unidades cada vez más pequeñas. En cambio, cuando se llega a la longitud de Planck (la longitud de una cuerda) y al tiempo de Planck (el tiempo que tardaría la luz en recorrer la longitud de una cuerda) y se intenta dividir el espacio y el tiempo de forma más fina, se descubre que no se puede. El concepto de "ir más pequeño" deja de tener sentido una vez que se alcanza el tamaño del componente *más pequeño* del cosmos. Para las partículas de punto de tamaño cero esto no

introduce ninguna restricción, pero como las cuerdas tienen tamaño, sí lo tiene. Si la teoría de las cuerdas es correcta, los conceptos habituales de espacio y tiempo, el marco en el que todas nuestras experiencias diarias tienen lugar, simplemente no se aplican en escalas más finas que la escala de Planck, la escala de las propias cuerdas.

En cuanto a los conceptos que se imponen, todavía no hay consenso. Una posibilidad que se contradice con la explicación anterior de cómo la teoría de las cuerdas entrelaza la mecánica cuántica y la relatividad general es que el tejido del espacio en la escala de Planck se parece a una red o a una malla, con el "espacio" entre las líneas de la malla fuera de los límites de la realidad física. Al igual que una hormiga microscópica que camina sobre un trozo de tela ordinaria tendría que saltar de hilo en hilo, quizás el movimiento a través del espacio en las escalas ultramicroscópicas requiere igualmente de saltos discretos de una "hebra" de espacio a otra. El tiempo también podría tener una estructura granulosa, con momentos individuales apretados estrechamente entre sí, pero sin fundirse en un continuo sin costuras. De esta manera, los conceptos de espacio e intervalos de tiempo cada vez más pequeños llegarían a su fin en la escala de Planck. Así como no existe una moneda americana de valor inferior a un centavo, si el espacio tiempo ultramicroscópico tiene una estructura de cuadrícula, no existiría una distancia inferior a la longitud de Planck o una duración inferior al tiempo de Planck.

Otra posibilidad es que el espacio y el tiempo no dejen de tener significado abruptamente en escalas extremadamente pequeñas, sino que se transformen gradualmente en otros conceptos más fundamentales. Encogerse más pequeño que la escala de Planck estaría fuera de los límites no porque te encuentres con una cuadrícula fundamental, sino porque los conceptos de espacio y tiempo se transforman en nociones para las cuales "encogerse más pequeño" no tiene sentido como preguntar si el número nueve es feliz. Es decir, podemos imaginar que como el espacio y el tiempo macroscópicos familiares se transforman gradualmente en sus homólogos ultramicroscópicos desconocidos, muchas de sus propiedades habituales, como la duración y la duración, se vuelven irrelevantes o sin sentido. Así como se puede estudiar sensatamente la temperatura y la viscosidad del agua líquida -conceptos que se aplican a las propiedades macroscópicas de un fluido- pero cuando se llega a la escala de las moléculas individuales de H_2O, estos conceptos dejan de tener sentido, así, tal vez, aunque se puedan dividir las regiones del espacio y las duraciones del tiempo por la mitad y otra vez por la mitad en las escalas cotidianas, al pasar la escala de Planck sufren una transformación que hace que tal división carezca de sentido.

Muchos teóricos de cuerdas, entre los que me incluyo, sospechan fuertemente que algo así sucede realmente, pero para ir más allá necesitamos averiguar los conceptos más fundamentales en los que el espacio y el tiempo se transforman.[33] Hasta la fecha, esta es una pregunta sin respuesta, pero las investigaciones de

vanguardia (descritas en el capítulo final) han sugerido algunas posibilidades con implicaciones de gran alcance.

Los puntos más finos

Con la descripción que he dado hasta ahora, podría parecer desconcertante que cualquier físico se resista al encanto de la teoría de cuerdas. Aquí, finalmente, hay una teoría que promete realizar el sueño de Einstein y más; una teoría que podría sofocar la hostilidad entre la mecánica cuántica y la relatividad general; una teoría con la capacidad de unificar toda la materia y todas las fuerzas describiendo todo en términos de cuerdas vibratorias; una teoría que sugiere un reino ultramicroscópico en el que el espacio y el tiempo familiar podría ser tan pintoresco como un teléfono giratorio; una teoría, en resumen, que promete llevar nuestra comprensión del universo a un nivel totalmente nuevo. Pero tened en cuenta que nadie ha visto nunca una cuerda y, excepto por algunas ideas inconformes discutidas en el siguiente capítulo, es probable que incluso si la teoría de las cuerdas es correcta, nadie lo haga nunca. Las cuerdas son tan pequeñas que una observación directa equivaldría a leer el texto de esta página desde una distancia de 100 años luz: se necesitaría un poder de resolución casi mil millones de billones de veces más fino que el que permite nuestra tecnología actual. Algunos científicos argumentan a viva voz que una teoría tan alejada de las pruebas empíricas directas se encuentra en el ámbito de la filosofía o la teología, pero no en el de la física.

Encuentro esta visión miope, o, al menos, prematura. Mientras que nunca tendremos una tecnología capaz de ver las cuerdas directamente, la historia de la ciencia está repleta de teorías que fueron probadas experimentalmente a través de medios indirectos.[13] La teoría de las cuerdas no es modesta. Sus metas y promesas son grandes. Y eso es emocionante y útil, porque si una teoría va a ser *la teoría* de nuestro universo, debe estar a la altura del mundo real no sólo en el amplio esquema discutido hasta ahora, sino también en el detalle. Como vamos a discutir ahora, ahí están las pruebas potenciales.

Durante las décadas de 1960 y 1970, los físicos de partículas hicieron grandes progresos en la comprensión de la estructura cuántica de la materia y las fuerzas no gravitacionales que rigen su comportamiento. El marco al que finalmente se orientaron por los resultados experimentales y los conocimientos teóricos se denomina *modelo estándar* de la física de partículas y se basa en la mecánica cuántica, las partículas de materia de la Tabla 12.1, y las partículas de fuerza de la Tabla 12.2 (ignorando el gravitón, ya que el modelo estándar no incorpora la gravedad, e incluyendo la partícula Higgs, que no figura en las tablas), todas ellas consideradas como partículas puntuales. El modelo estándar es capaz de explicar esencialmente todos los datos producidos por los rompedores de átomos del

mundo, y a lo largo de los años sus inventores han sido merecidamente elogiados con los más altos honores. Aún así, el modelo estándar tiene limitaciones significativas. Ya hemos discutido cómo este, y todos los demás enfoques anteriores a la teoría de las cuerdas, no lograron fusionar la gravedad y la mecánica cuántica. Pero también hay otros defectos.

El modelo estándar no explicó *por qué* las fuerzas se transmiten por la lista precisa de partículas de la Tabla 12.2 y *por qué* la materia está compuesta por la lista precisa de partículas de la Tabla 12.1. ¿Por qué hay tres familias de partículas de la materia y por qué cada familia tiene las partículas que tiene? ¿Por qué no dos familias o sólo una? ¿Por qué el electrón tiene tres veces más carga eléctrica que el quark de abajo? ¿Por qué el muón pesa 23,4 veces más que el up-quark, y por qué el top-quark pesa unas 350.000 veces más que un electrón? ¿Por qué el universo está construido con este rango de números aparentemente aleatorios? El modelo estándar toma las partículas de las tablas 12.1 y 12.2 (de nuevo, ignorando el gravitón) como *entrada, y luego* hace predicciones impresionantemente precisas sobre cómo las partículas interactuarán e influirán entre sí. Pero el modelo estándar no puede explicar la entrada -las partículas y sus propiedades- más de lo que tu calculadora puede explicar los números que introdujiste la última vez que la usaste.

Desconcertar las propiedades de estas partículas no es una cuestión académica de por qué tal o cual detalle esotérico resulta ser de una forma u otra. Durante el último siglo, los científicos se han dado cuenta de que el universo tiene las características familiares de la experiencia común sólo porque las partículas de las tablas 12.1 y 12.2 tienen precisamente las propiedades que tienen. Incluso cambios bastante menores en las masas o cargas eléctricas de algunas de las partículas, por ejemplo, las harían incapaces de participar en los procesos nucleares que alimentan a las estrellas. Y sin estrellas, el universo sería un lugar completamente diferente. Así, las características detalladas de las partículas elementales están entrelazadas con lo que muchos consideran la cuestión más profunda de toda la ciencia:*¿Por qué las partículas elementales tienen las propiedades correctas para permitir que ocurran los procesos nucleares, que las estrellas se iluminen, que se formen planetas alrededor de las estrellas, y que al menos en uno de esos planetas exista vida?*

El modelo estándar no puede ofrecer ninguna información sobre esta cuestión, ya que las propiedades de las partículas son parte de su aporte requerido. La teoría no comenzará a avanzar y a producir resultados hasta que las propiedades de las partículas sean especificadas. Pero la teoría de cuerdas es diferente. En la teoría de cuerdas, las propiedades de las partículas están *determinadas* por los patrones de vibración de las cuerdas y por lo tanto la teoría tiene la promesa de proporcionar una explicación.

Propiedades de las partículas en la teoría de las cuerdas

Para entender el nuevo marco explicativo de la teoría de las cuerdas, necesitamos tener una mejor idea de cómo las vibraciones de las cuerdas producen las propiedades de las partículas, así que consideremos la propiedad más simple de una partícula, su masa.

A partir de $E = mc^2$, sabemos que la masa y la energía son intercambiables; como los dólares y los euros, son monedas convertibles (pero a diferencia de las monedas monetarias, tienen un tipo de cambio fijo, dado por la propia velocidad de los tiempos de la luz, c^2). Nuestra supervivencia depende de la ecuación de Einstein, ya que el calor y la luz que sostienen la vida del sol se generan por la conversión de 4,3 millones de toneladas de materia en energía cada segundo; algún día, los reactores nucleares de la Tierra podrán emular al sol aprovechando de forma segura la ecuación de Einstein para proporcionar a la humanidad un suministro de energía esencialmente ilimitado.

En estos ejemplos, la energía se produce a partir de la masa. Pero la ecuación de Einstein funciona perfectamente bien al revés -la dirección en la que la masa se produce a partir de la energía- y esa es la dirección en la que la teoría de cuerdas utiliza la ecuación de Einstein. La *masa* de una partícula en la teoría de cuerdas no es más que la *energía* de su cuerda vibrante. Por ejemplo, la explicación que ofrece la teoría de cuerdas de por qué una partícula es más pesada que otra es que la cuerda que constituye la partícula más pesada está vibrando más rápido y más furiosamente que la cuerda que constituye la partícula más liviana. Una vibración más rápida y furiosa significa mayor energía, y una mayor energía se traduce, a través de la ecuación de Einstein, en una mayor masa. Por el contrario, cuanto más ligera es una partícula, más lenta y menos frenética es la correspondiente vibración de la cuerda; una partícula sin masa como un fotón o un gravitón corresponde a una cuerda ejecutando el patrón vibratorio más plácido y suave que pueda.[34] [14]

Otras propiedades de una partícula, como su carga eléctrica y su giro, se codifican a través de características más sutiles de las vibraciones de la cuerda. En comparación con la masa, estas características son más difíciles de describir de forma no matemática, pero siguen la misma idea básica: el patrón de vibración es la huella de la partícula; todas las propiedades que usamos para distinguir una partícula de otra están determinadas por el patrón de vibración de la cuerda de la partícula.

A principios de los 70, cuando los físicos analizaron los patrones de vibración que surgieron en la primera encarnación de la teoría de las cuerdas -la teoría de las cuerdas *bosónicas*- para determinar los tipos de propiedades de las partículas que la teoría predijo, tuvieron un problema. Cada patrón de vibración en la teoría de cuerdas bosónicas tenía un número entero de espín: espín-0, espín-1, espín-2, y

así sucesivamente. Esto era un problema, porque aunque las partículas mensajeras tienen valores de espín de este tipo, las partículas de materia (como los electrones y los quarks) no. Tienen una cantidad fraccionaria de spin, spin-½. En 1971, Pierre Ramond de la Universidad de Florida se propuso remediar esta deficiencia; en breve, encontró una forma de modificar las ecuaciones de la teoría de las cuerdas bosónicas para permitir también patrones vibratorios de medio número entero.

De hecho, al examinar más de cerca, la investigación de Ramond, junto con los resultados encontrados por Schwarz y su colaborador André Neveu y las posteriores ideas de Ferdinando Gliozzi, Joël Scherk y David Olive, revelaron un equilibrio perfecto -una novedosa simetría- entre los patrones de vibración con diferentes giros en la teoría de cuerdas modificada. Estos investigadores encontraron que los nuevos patrones vibratorios surgieron en pares cuyos valores de giro diferían en media unidad. Para cada patrón de vibración con giro-½ había un patrón de vibración asociado con el giro-0. Por cada patrón de vibración del giro 1, había un patrón de vibración asociado al giro ½, y así sucesivamente. La relación entre los valores de spin enteros y semi-enteros se llamó *supersimetría,* y con estos resultados nació la teoría de cuerdas supersimétrica*,* o *teoría de supercuerdas*. Casi una década más tarde, cuando Schwarz y Green mostraron que todas las anomalías potenciales que amenazaban a la teoría de cuerdas se cancelaban entre sí, en realidad estaban trabajando en el marco de la teoría de las supercuerdas, por lo que la revolución que su trabajo encendió en 1984 se llama más apropiadamente la primera revolución *de las supercuerdas.* (En lo que sigue, a menudo nos referiremos a las cuerdas y a la teoría de las cuerdas, pero eso es sólo una abreviatura; siempre nos referimos a las supercuerdas y a la teoría de las supercuerdas).

Con estos antecedentes, ahora podemos afirmar lo que significaría para la teoría de cuerdas llegar más allá de las características de la maleza y explicar el universo en detalle. Se reduce a esto: entre los patrones de vibración que las cuerdas pueden ejecutar, debe haber patrones cuyas propiedades coincidan con las de las especies de partículas conocidas. La teoría tiene patrones de vibración con spin-½, pero debe tener patrones de vibración con spin-½ que coincidan precisamente con las partículas de materia conocidas, como se resume en la Tabla 12.1. La teoría tiene patrones de vibración con spin-1, pero debe tener patrones de vibración con spin-1 que coincidan *precisamente con las partículas mensajeras conocidas*, como se resume en la Tabla 12.2. Por último, si los experimentos descubren efectivamente las partículas de espín-0, como se predicen para los campos de Higgs, la teoría de cuerdas debe producir también patrones de vibración que coincidan *precisamente con las* propiedades de estas partículas. En resumen, para que la teoría de cuerdas sea viable, sus patrones de vibración deben producir y explicar las partículas del modelo estándar.

Aquí, entonces, está la gran oportunidad de la teoría de cuerdas. Si la teoría de las cuerdas es correcta, *hay*una explicación para las propiedades de las partículas que los experimentadores han medido, y se encuentra en los patrones de vibración resonante que las cuerdas pueden ejecutar. Si las propiedades de estos patrones de vibración coinciden con las propiedades de las partículas en las tablas 12.1 y 12.2, creo que eso convencería incluso a los escépticos acérrimos de la veracidad de la teoría de las cuerdas, tanto si alguien ha visto directamente la estructura extendida de una cuerda como si no. Y más allá de establecerse como la tan buscada teoría unificada, con tal coincidencia entre la teoría y los datos experimentales, la teoría de cuerdas proporcionaría la primera explicación fundamental de por qué el universo es como es.

Entonces, ¿cómo le va a la teoría de cuerdas en esta prueba crítica?

Demasiadas vibraciones

Bueno, a primera vista, la teoría de cuerdas falla. Para empezar, hay un número infinito de diferentes patrones de vibración de las cuerdas, con los primeros de una serie interminable ilustrada esquemáticamente en la figura 12.4. Sin embargo, las tablas 12.1 y 12.2 contienen sólo una lista finita de partículas, por lo que desde el principio parece haber un gran desajuste entre la teoría de cuerdas y el mundo real. Es más, cuando analizamos matemáticamente las posibles energías -y por lo tanto las masas- de estos patrones de vibración, nos encontramos con otro desajuste significativo entre la teoría y la observación. Las masas de los patrones de vibración de las cuerdas permitidas no tienen ningún parecido con las masas de partículas medidas experimentalmente que se registran en las tablas 12.1 y 12.2. No es difícil ver por qué.

Desde los primeros días de la teoría de las cuerdas, los investigadores se han dado cuenta de que la rigidez de una cuerda es inversamente proporcional a su longitud (su longitud al cuadrado, para ser más precisos): mientras que las cuerdas largas son fáciles de doblar, cuanto más corta es la cuerda más rígida se vuelve. En 1974, cuando Schwarz y Scherk propusieron disminuir el tamaño de las cuerdas para que incorporaran una fuerza gravitatoria de la resistencia adecuada, también propusieron aumentar la tensión de las cuerdas, hasta llegar a unos mil billones de billones de billones (10^{39}) de toneladas, unas 1000000000000000000000000000000000000000 (10^{41}) veces la tensión de una cuerda de piano media. Ahora bien, si imaginas doblar una cuerda diminuta y extremadamente rígida en uno de los patrones cada vez más elaborados de la figura 12.4, te darás cuenta de que cuantos más picos y bajos haya, más energía tendrás que ejercer. Por el contrario, una vez que una cuerda vibra en un patrón tan elaborado, encarna una enorme cantidad de energía. Así, todos los patrones vibratorios de las cuerdas, excepto los más simples, son

altamente energéticos y por lo tanto, vía $E = mc^2$, corresponden a partículas con masas enormes.

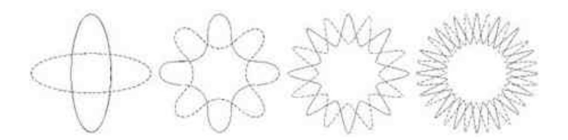


Figura 12.4 Los primeros ejemplos de los patrones de vibración de las cuerdas.

Y por enorme, realmente quiero decir enorme. Los cálculos muestran que las masas de las vibraciones de las cuerdas siguen una serie análoga a la de los armónicos musicales: son todas múltiplos de una masa fundamental, la masa de *Planck, de la misma* manera que los sobretonos son todos múltiplos de una frecuencia o tono fundamental. Según los estándares de la física de partículas, la masa de Planck es colosal: es unos 10.000 millones de billones (10^{19}) de veces la masa de un protón, aproximadamente la masa de una mota de polvo o una bacteria. Por lo tanto, las posibles masas de las vibraciones de las cuerdas son 0 veces la masa de Planck, 1 vez la masa de Planck, 2 veces la masa de Planck, 3 veces la masa de Planck, y así sucesivamente, mostrando que las masas de todas las vibraciones de las cuerdas, excepto la de la masa 0, son gigantescas.[15]

Como puedes ver, algunas de las partículas de las tablas 12.1 y 12.2 no tienen masa, pero la mayoría no. Y las masas no nulas en las tablas están más lejos de la masa de Planck de lo que el Sultán de Brunei está de necesitar un préstamo. Por lo tanto, vemos claramente que las masas de partículas conocidas no se ajustan al patrón avanzado por la teoría de cuerdas. ¿Significa esto que la teoría de cuerdas está descartada? Usted podría pensar que sí, pero no es así. Tener una lista interminable de patrones de vibración cuyas masas se alejan cada vez más de las de las partículas conocidas es un desafío que la teoría debe superar. Años de investigación han revelado estrategias prometedoras para hacerlo.

Para empezar, nótese que los experimentos con las especies de partículas conocidas nos han enseñado que las partículas pesadas tienden a ser inestables; típicamente, las partículas pesadas se desintegran rápidamente en una lluvia de partículas de menor masa, generando en última instancia las especies más ligeras y familiares de las Tablas 12.1 y 12.2. (Por ejemplo, el quark top se desintegra en unos 10^{-24} segundos.) Esperamos que esta lección sea válida para los patrones de vibración de las cuerdas "superpesadas", y eso explicaría por qué, incluso si se produjeran copiosamente en el caliente y primitivo universo, pocas o ninguna habrían sobrevivido hasta hoy. Incluso si la teoría de las cuerdas es correcta, nuestra única oportunidad de ver los patrones vibratorios superpesados sería producirlos a través de colisiones de alta energía en aceleradores de partículas. Sin embargo, como los aceleradores actuales sólo pueden alcanzar energías equivalentes a unas 1.000 veces la masa de un protón, son demasiado débiles

para excitar más que los patrones vibratorios más plácidos de la teoría de cuerdas. Por lo tanto, la predicción de la teoría de las cuerdas de una torre de partículas con masas que empiezan a ser un millón de miles de millones de veces mayores que las que se pueden alcanzar con la tecnología actual no está en conflicto con las observaciones.

Esta explicación también deja claro que el contacto entre la teoría de cuerdas y la física de partículas sólo implicará las vibraciones de cuerda de más baja energía -la masa-, ya que las otras están mucho más allá de lo que podemos alcanzar con la tecnología actual. ¿Pero qué hay del hecho de que la mayoría de las partículas de las tablas 12.1 y 12.2 no son sin masa? Es un tema importante, pero menos preocupante de lo que podría parecer a primera vista. Dado que la masa de Planck es enorme, incluso la partícula más masiva conocida, el top-quark, pesa sólo 0,0000000000000000116 (alrededor de 10^{-17}) veces la masa de Planck. En cuanto al electrón, pesa 0,0000000000000000000000034 (alrededor de $10^{a\ 23}$) veces la masa de Planck. Por lo tanto, para una primera aproximación *-válida para mejor que 1* parte en 10^{17} - todas las partículas en las tablas 12.1 y 12.2 tienen masas iguales a cero veces la masa de Planck (tanto como la riqueza de la mayoría de los terrícolas, para una primera aproximación, es 0 veces la del Sultán de Brunei), tal como lo "predijo" la teoría de cuerdas. Nuestro objetivo es mejorar esta aproximación y mostrar que la teoría de cuerdas explica las diminutas desviaciones de 0 veces la masa de Planck característica de las partículas de las tablas 12.1 y 12.2. Pero los patrones de vibración sin masa no están tan en desacuerdo con los datos como se podría haber pensado inicialmente.

Esto es alentador, pero un escrutinio detallado revela aún más desafíos. Usando las ecuaciones de la teoría de las supercuerdas, los físicos han enumerado todos los patrones de vibración de las cuerdas sin masa. Una entrada es el gravitón de spin-2, y ese es el gran éxito que lanzó todo el tema; asegura que la gravedad es una parte de la teoría cuántica de cuerdas. Pero los cálculos también muestran que hay *muchos* más patrones vibratorios de spin-1 sin masa que los que hay en las partículas de la Tabla 12.2, y hay *muchos* más patrones vibratorios de $^{spin-1}$/2 sin masa que los que hay en las partículas de la Tabla 12.1. Además, la lista de patrones de vibración de spin-½ no muestra ningún rastro de agrupaciones repetitivas como la estructura familiar de la Tabla 12.1. Con una inspección menos superficial, entonces, parece cada vez más difícil ver cómo las vibraciones de las cuerdas se alinearán con las especies de partículas conocidas.

Así, a mediados de la década de 1980, si bien había razones para entusiasmarse con la teoría de las supercuerdas, también había razones para ser escépticos. Indiscutiblemente, la teoría de las supercuerdas presentó un paso audaz hacia la unificación. Al proporcionar el primer enfoque consistente para fusionar la gravedad y la mecánica cuántica, hizo para la física lo que Roger Bannister hizo para el kilómetro y medio en cuatro minutos: mostró lo aparentemente imposible de ser posible. La teoría de las supercuerdas estableció definitivamente que

podíamos romper la barrera aparentemente impenetrable que separa los dos pilares de la física del siglo XX.

Sin embargo, al tratar de ir más allá y demostrar que la teoría de las supercuerdas podía explicar las características detalladas de la materia y las fuerzas de la naturaleza, los físicos encontraron dificultades. Esto llevó a los escépticos a proclamar que la teoría de las supercuerdas, a pesar de todo su potencial de unificación, era simplemente una estructura matemática sin relevancia directa para el universo físico.

Incluso con los problemas que acabamos de discutir, en la parte superior de la lista de los escépticos de los defectos de la teoría de las supercuerdas era una característica que todavía tengo que introducir. La teoría de las supercuerdas proporciona una fusión exitosa de la gravedad y la mecánica cuántica, una que está libre de las inconsistencias matemáticas que plagaron todos los intentos anteriores. Sin embargo, por extraño que parezca, en los primeros años después de su descubrimiento, los físicos descubrieron que las ecuaciones de la teoría de las supercuerdas *no* tienen estas envidiables propiedades si el universo tiene tres dimensiones espaciales. En cambio, las ecuaciones de la teoría de las supercuerdas son matemáticamente consistentes sólo si el universo tiene *nueve dimensiones espaciales*, o, incluyendo la dimensión temporal, ¡sólo funcionan en un universo con *diez dimensiones espacio-temporales*!

En comparación con esta afirmación tan extraña, la dificultad de hacer una alineación detallada entre los patrones de vibración de las cuerdas y las especies de partículas conocidas parece ser un tema secundario. La teoría de las supercuerdas requiere la existencia de *seis* dimensiones del espacio que nadie ha visto nunca. Ese no es un punto fino - *es* un problema.

¿O no?

Los descubrimientos teóricos realizados durante las primeras décadas del siglo XX, mucho antes de que la teoría de cuerdas entrara en escena, sugirieron que las dimensiones adicionales no tenían por qué ser un problema en absoluto. Y, con una actualización de finales del siglo XX, los físicos demostraron que estas dimensiones adicionales tienen la capacidad de salvar la brecha entre los patrones vibratorios de la teoría de cuerdas y las partículas elementales que los experimentadores han descubierto.

Este es uno de los desarrollos más gratificantes de la teoría; veamos cómo funciona.

Unificación en dimensiones superiores

En 1919, Einstein recibió un documento que podría haber sido fácilmente descartado como los desvaríos de una manivela. Fue escrito por un matemático alemán poco conocido llamado Theodor Kaluza, y en unas pocas páginas breves estableció un enfoque para unificar las dos fuerzas conocidas en ese momento, la gravedad y el electromagnetismo. Para lograr este objetivo, Kaluza propuso un alejamiento radical de algo tan básico, tan completamente dado por sentado, que parecía incuestionable. Propuso que el universo no tiene tres dimensiones espaciales. En su lugar, Kaluza pidió a Einstein y al resto de la comunidad de físicos que consideraran la posibilidad de que el universo tuviera *cuatro dimensiones espaciales, de modo que*, junto con el tiempo, tuviera un total de cinco dimensiones espacio-temporales.

En primer lugar, ¿qué significa eso? Bueno, cuando decimos que hay tres dimensiones espaciales queremos decir que hay tres direcciones o ejes independientes a lo largo de los cuales te puedes mover. Desde tu posición actual puedes delinearlos como izquierda/derecha, atrás/adelante y arriba/abajo; en un universo con tres dimensiones espaciales, cualquier movimiento que emprendas es una combinación de movimiento a lo largo de estas tres direcciones. Equivalentemente, en un universo con tres dimensiones espaciales necesitas precisamente tres piezas de información para especificar una ubicación. En una ciudad, por ejemplo, necesitas la calle de un edificio, su calle transversal y un número de piso para especificar el paradero de una cena. Y si quieres que la gente se presente mientras la comida aún está caliente, también necesitas especificar un cuarto dato: la hora. A eso nos referimos cuando decimos que el espacio-tiempo es cuatridimensional.

Kaluza propuso que además de izquierda/derecha, atrás/adelante y arriba/abajo, *el universo tiene una dimensión espacial más que, por alguna razón, nadie ha visto nunca.* Si es correcto, esto significaría que hay otra dirección independiente en la que las cosas pueden moverse, y por lo tanto que necesitamos dar cuatro piezas de información para especificar una ubicación precisa en el espacio, y un total de cinco piezas de información si también especificamos un tiempo.

Bien; eso es lo que el documento que Einstein recibió en abril de 1919 propuso. La pregunta es, ¿por qué Einstein no lo tiró? No vemos otra dimensión espacial, nunca nos encontramos vagando sin rumbo porque una calle, una calle transversal y un número de piso son de alguna manera insuficientes para especificar una dirección, así que ¿por qué contemplar una idea tan extraña? Bueno, aquí está el porqué. Kaluza se dio cuenta de que las ecuaciones de la teoría general de la relatividad de Einstein podían extenderse matemáticamente con bastante facilidad a un universo que tuviera una dimensión espacial más. Kaluza emprendió esta extensión y descubrió, de forma bastante natural, que la versión de dimensiones superiores de la relatividad general no sólo incluía las ecuaciones originales de la gravedad de Einstein, sino que, debido a la dimensión espacial adicional, también tenía ecuaciones adicionales. Cuando Kaluza estudió

estas ecuaciones extra, descubrió algo extraordinario: ¡las ecuaciones extra no eran otra cosa que las ecuaciones que Maxwell había descubierto en el siglo XIX para describir el campo electromagnético! Al imaginar un universo con una nueva dimensión espacial, Kaluza había propuesto una solución a lo que Einstein consideraba uno de los problemas más importantes de toda la física.Kaluza *había encontrado un marco que combinaba las ecuaciones originales de Einstein de la relatividad general con las de Maxwell del electromagnetismo.* Por eso Einstein no tiró el papel de Kaluza.

Intuitivamente, puedes pensar en la propuesta de Kaluza así. En la relatividad general, Einstein despertó el espacio y el tiempo. Mientras se flexionaban y estiraban, Einstein se dio cuenta de que había encontrado la encarnación geométrica de la fuerza gravitatoria. El trabajo de Kaluza sugería que el alcance geométrico del espacio y el tiempo era aún mayor. Mientras que Einstein se dio cuenta de que los campos gravitatorios pueden describirse como deformaciones y ondulaciones en las tres dimensiones habituales del espacio y el tiempo, Kaluza se dio cuenta de que en un universo con una dimensión espacial adicional habría deformaciones y ondulaciones adicionales. Y esas deformaciones y ondulaciones, según su análisis, serían perfectas para describir los campos electromagnéticos. En manos de Kaluza, el propio enfoque geométrico de Einstein sobre el universo demostró ser lo suficientemente poderoso para unir la gravedad y el electromagnetismo.

Por supuesto, todavía había un problema. Aunque las matemáticas funcionaban, no había y sigue sin haber evidencia de una dimensión espacial más allá de las tres que todos conocemos. Entonces, ¿fue el descubrimiento de Kaluza una mera curiosidad, o fue de alguna manera relevante para nuestro universo? Kaluza confiaba mucho en la teoría, por ejemplo, había aprendido a nadar estudiando un tratado de natación y luego se zambulló en el mar, pero la idea de una dimensión espacial invisible, por muy convincente que fuera la teoría, seguía sonando escandalosa. Entonces, en 1926, el físico sueco Oskar Klein inyectó un nuevo giro a la idea de Kaluza, uno que sugería dónde podría esconderse la dimensión adicional.

Las dimensiones ocultas

Para entender la idea de Klein, imagina a Philippe Petit caminando en una larga cuerda floja recubierta de goma entre el Monte Everest y Lhotse. Visto desde una distancia de muchos kilómetros, como en la figura 12.5, la cuerda floja parece ser un objeto unidimensional como una línea, un objeto que sólo tiene extensión a lo largo de su longitud. Si nos dijeran que un pequeño gusano se desliza por la cuerda floja frente a Philippe, lo animaríamos salvajemente porque necesita adelantarse al paso de Philippe para evitar el desastre. Por supuesto, con un

momento de reflexión todos nos damos cuenta de que hay más en la superficie de la cuerda floja que la dimensión izquierda/derecha que podemos percibir directamente. Aunque es difícil de ver a simple vista desde una gran distancia, la superficie de la cuerda floja tiene una segunda dimensión: la dimensión en el sentido de las agujas del reloj o en sentido contrario que está "envuelta" alrededor de ella. Con la ayuda de un modesto telescopio, esta dimensión circular se hace visible y vemos que el gusano puede moverse no sólo en la larga y desenrollada dirección izquierda/derecha sino también en la corta y "enrollada" dirección del sentido de las agujas del reloj/contrahorario. Es decir, en cada punto de la cuerda floja, el gusano tiene dos direcciones independientes en las que puede moverse (a eso nos referimos cuando decimos que la superficie de la cuerda floja es bidimensional [35]), por lo que puede mantenerse fuera del camino de Philippe, ya sea deslizándose delante de él, como imaginamos inicialmente, o arrastrándose por la diminuta dimensión circular y dejando que Philippe pase por encima.

La cuerda floja ilustra que las dimensiones -las direcciones independientes en las que cualquier cosa puede moverse- se presentan en dos variedades cualitativamente distintas. Pueden ser grandes y fáciles de ver, como la dimensión izquierda/derecha de la superficie de la cuerda floja, o pueden ser diminutas y más difíciles de ver, como la dimensión en el sentido de las agujas del reloj/contrahorario que gira alrededor de la superficie de la cuerda floja. En este ejemplo, no fue un gran desafío ver la pequeña circunferencia circular de la superficie de la cuerda floja. Todo lo que necesitábamos era un instrumento de aumento razonable. Pero como puedes imaginar, cuanto más pequeña es una dimensión enroscada, más difícil es de detectar. A una distancia de unos pocos kilómetros, una cosa es revelar la dimensión circular de la superficie de la cuerda floja, y otra muy distinta es revelar la dimensión circular de algo tan delgado como el hilo dental o una fibra nerviosa estrecha.

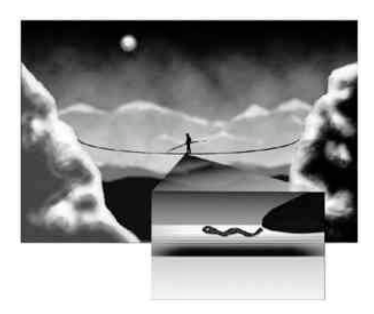


Figura 12.5 Desde la distancia, un cable de la cuerda floja parece unidimensional, aunque con un telescopio lo suficientemente fuerte, su segunda dimensión enroscada se hace visible.

La contribución de Klein fue sugerir que lo que es cierto para un objeto *dentro* del universo podría ser cierto para el tejido del propio universo. A saber, así como la superficie de la cuerda floja tiene dimensiones grandes y pequeñas, también lo

tiene el tejido del espacio. Tal vez las tres dimensiones que todos conocemos, izquierda/derecha, atrás/adelante y arriba/abajo, son como la extensión horizontal de la cuerda floja, dimensiones de la gran variedad fácil de ver. Pero así como la superficie de la cuerda floja tiene una dimensión adicional, pequeña, enroscada y circular, tal vez el tejido del espacio también tenga una dimensión pequeña, enroscada y circular, una tan pequeña que nadie tiene un equipo de aumento lo suficientemente potente como para revelar su existencia. Debido a su pequeño tamaño, Klein argumentó, la dimensión estaría oculta.

¿Qué tan pequeño es pequeño? Bueno, al incorporar ciertas características de la mecánica cuántica a la propuesta original de Kaluza, el análisis matemático de Klein reveló que el radio de una dimensión espacial extra circular sería probablemente aproximadamente la longitud de Planck, [16] ciertamente demasiado pequeño para la accesibilidad experimental (el equipo actual de última generación no puede resolver nada más pequeño que una milésima parte del tamaño de un núcleo atómico, quedando por debajo de la longitud de Planck en más de un factor de un millón de miles de millones). Sin embargo, para un gusano imaginario del tamaño de Planck, esta diminuta dimensión circular enroscada proporcionaría una nueva dirección en la que podría vagar tan libremente como un gusano ordinario negocia la dimensión circular de la cuerda floja en la figura 12.5. Por supuesto, al igual que un gusano ordinario descubre que no hay mucho espacio para explorar en el sentido de las agujas del reloj antes de encontrarse de vuelta en su punto de partida, un gusano del tamaño de Planck que se desliza a lo largo de una dimensión acurrucada del espacio también volvería repetidamente en círculo a su punto de partida. Pero aparte de la longitud del viaje que permite, una dimensión enroscada proporcionaría una dirección en la que el diminuto gusano podría moverse tan fácilmente como lo hace en las tres dimensiones desenrolladas conocidas.

Para tener una idea intuitiva de cómo se ve esto, noten que lo que hemos estado llamando la dimensión enroscada de la cuerda floja, en sentido horario y antihorari*, existe en cada punto a lo largo de su dimensión extendida.* El gusano de tierra puede deslizarse alrededor de la circunferencia circular de la cuerda floja en cualquier punto a lo largo de su longitud extendida, por lo que la superficie de la cuerda floja puede describirse como si tuviera una dimensión larga, con una diminuta dirección circular clavada en cada punto, como en la figura 12.6. Esta es una imagen útil para tener en mente porque también se aplica a la propuesta de Klein de ocultar la dimensión extra del espacio de Kaluza.

Para ver esto, examinemos de nuevo el tejido del espacio mostrando secuencialmente su estructura en escalas de distancia cada vez más pequeñas, como en la figura 12.7. En los primeros niveles de ampliación, no se revela nada nuevo: el tejido del espacio sigue apareciendo tridimensional (que, como es habitual, representamos esquemáticamente en la página impresa mediante una cuadrícula bidimensional). Sin embargo, cuando bajamos a la escala de Planck, el

mayor nivel de aumento de la figura, Klein sugirió que una nueva dimensión acurrucada se hace visible.

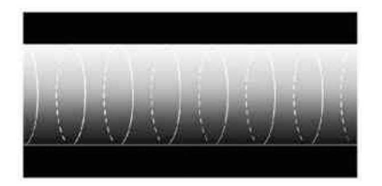


Figura 12.6 La superficie de una cuerda floja tiene una dimensión larga con una dimensión circular clavada en cada punto.

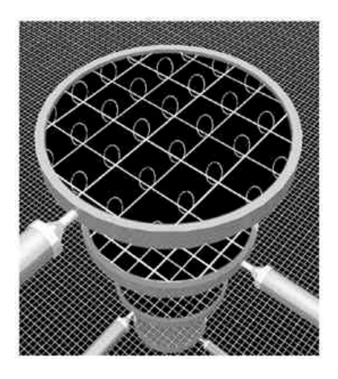


Figura 12.7 La propuesta de Kaluza-Klein es que en escalas muy pequeñas, el espacio tiene una dimensión circular extra pegada a cada punto familiar.

Así como la dimensión circular de la cuerda floja existe en cada punto a lo largo de su gran dimensión extendida, la dimensión circular en esta propuesta existe en cada punto en las tres dimensiones extendidas conocidas de la vida diaria. En la figura 12.7, ilustramos esto dibujando la dimensión circular adicional en varios puntos a lo largo de las dimensiones extendidas (ya que dibujar el círculo en cada punto oscurecería la imagen) y se puede ver inmediatamente la similitud con la cuerda floja en la figura 12.6. Por lo tanto, en la propuesta de Klein, el espacio debe preverse como si tuviera tres dimensiones desplegadas (de las cuales mostramos sólo dos en la figura) con una dimensión circular adicional pegada en cada punto. Obsérvese que la dimensión adicional no es una protuberancia o un bucle dentro de las tres dimensiones espaciales habituales, como las limitaciones gráficas de la figura podrían hacer pensar. En su lugar, la dimensión adicional es una nueva dirección, completamente distinta de las tres que conocemos, que existe en cada punto de nuestro espacio tridimensional ordinario, pero que es tan pequeña que escapa a la detección incluso con nuestros instrumentos más sofisticados.

Con esta modificación de la idea original de Kaluza, Klein proporcionó una respuesta a cómo el universo podría tener más que las tres dimensiones

espaciales de experiencia común que podrían permanecer ocultas, un marco que desde entonces se ha conocido como la teoría de *Kaluza-Klein.* Y como una dimensión extra del espacio era todo lo que Kaluza necesitaba para fusionar la relatividad general y el electromagnetismo, la teoría de Kaluza-Klein parecería ser justo lo que Einstein estaba buscando. De hecho, Einstein y muchos otros se entusiasmaron con la unificación a través de una nueva dimensión espacial oculta, y se lanzó un vigoroso esfuerzo para ver si este enfoque funcionaría con todo detalle. Pero no pasó mucho tiempo antes de que la teoría de Kaluza-Klein se encontrara con sus propios problemas. Quizás el más evidente de todos, los intentos de incorporar el electrón en la imagen extra-dimensional resultó ser inviable.[17] Einstein continuó incursionando en el marco de Kaluza-Klein hasta al menos los primeros años de la década de 1940, pero la promesa inicial del enfoque no se materializó, y el interés se extinguió gradualmente.

Sin embargo, dentro de unas pocas décadas, la teoría de Kaluza-Klein tendría un espectacular regreso.

Teoría de las cuerdas y dimensiones ocultas

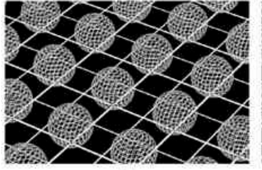
Además de las dificultades que la teoría de Kaluza-Klein encontró al tratar de describir el micromundo, había otra razón por la que los científicos dudaban sobre el enfoque. Muchos encontraron arbitrario y extravagante postular una dimensión espacial oculta. No es que Kaluza fuera llevado a la idea de una nueva dimensión espacial por una rígida cadena de razonamiento deductivo. En su lugar, sacó la idea de un sombrero, y al analizar sus implicaciones descubrió un vínculo inesperado entre la relatividad general y el electromagnetismo. Así, aunque fue un gran descubrimiento por derecho propio, carecía de un sentido de inevitabilidad. Si le preguntaras a Kaluza y Klein *por qué* el universo tenía cinco dimensiones espacio-temporales en lugar de cuatro, o seis, o siete, o 7.000 para el caso, no habrían tenido una respuesta mucho más convincente que "¿Por qué no?".

Más de tres décadas después, la situación cambió radicalmente. La teoría de cuerdas es el primer enfoque para fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica; además, tiene el potencial de unificar nuestra comprensión de todas las fuerzas y toda la materia. Pero las ecuaciones de la mecánica cuántica de la teoría de cuerdas no funcionan en cuatro dimensiones de espacio tiempo, ni en cinco, seis, siete o siete mil. En su lugar, por las razones que se discuten en la siguiente sección, las ecuaciones de la teoría de cuerdas funcionan sólo en diez dimensiones de espacio tiempo: nueve del espacio, más el tiempo. La teoría de cuerdas *exige* más dimensiones.

Este es un tipo de resultado fundamentalmente diferente, uno nunca antes encontrado en la historia de la física. Antes de las cuerdas, ninguna teoría decía nada sobre el número de dimensiones espaciales en el universo. Todas las

teorías, desde Newton a Maxwell y Einstein, asumían que el universo tenía tres dimensiones espaciales, de la misma manera que todos asumimos que el sol saldrá mañana. Kaluza y Klein plantearon un desafío al sugerir que había cuatro dimensiones espaciales, pero esto equivalía a otra suposición, una suposición diferente, pero una suposición de todos modos. Ahora, por primera vez, la teoría de cuerdas proporcionó ecuaciones que *predecían* el número de dimensiones espaciales. Un cálculo - no una suposición, ni una hipótesis, ni una suposición inspirada - determina el número de dimensiones espaciales según la teoría de cuerdas, y lo sorprendente es que el número calculado no es tres, sino nueve. La teoría de las cuerdas nos lleva, *inevitablemente,* a un universo con seis dimensiones espaciales adicionales y, por lo tanto, proporciona un contexto convincente y preparado para invocar las ideas de Kaluza y Klein.

La propuesta original de Kaluza y Klein asumía sólo una dimensión oculta, pero es fácilmente generalizable a dos, tres o incluso las seis dimensiones adicionales requeridas por la teoría de cuerdas. Por ejemplo, en la Figura 12.8a reemplazamos la dimensión circular adicional de la Figura 12.7, una forma unidimensional, con la superficie de una esfera, una forma bidimensional (recuerde de la discusión en el Capítulo 8 que la superficie de una esfera es bidimensional porque se necesitan dos piezas de información-como latitud y longitud en la superficie de la tierra-para especificar una ubicación). Al igual que con el círculo, debe imaginarse la esfera clavada en cada punto de las dimensiones habituales, aunque en la figura 12.8a, para mantener la imagen clara, sólo dibujamos las que se encuentran en las intersecciones de las líneas de la cuadrícula. En un universo de este tipo, se necesitaría un total de cinco piezas de información para localizar una posición en el espacio: tres piezas para localizar su posición en las grandes dimensiones (calle, cruce de calle, número de piso) y dos piezas para localizar su posición en la esfera (latitud, longitud) clavada en ese punto. Ciertamente, si el radio de la esfera fuera minúsculo, billones de veces más pequeño que un átomo, las dos últimas piezas de información no importarían mucho para seres comparativamente grandes como nosotros. Sin embargo, la dimensión adicional sería una parte integral de la composición ultramicroscópica del tejido espacial. Un gusano ultramicroscópico necesitaría las cinco piezas de información y, si incluimos el tiempo, necesitaría seis piezas de información para aparecer en la cena adecuada en el momento adecuado.


(a)

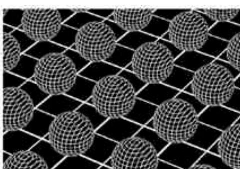

(b)

Figura 12.8 Un primer plano de un universo con las tres dimensiones usuales, representadas por la cuadrícula, y **(** a **)** dos dimensiones enroscadas, en forma de esferas huecas, y **(** b **)** tres dimensiones enroscadas en forma de bolas sólidas.

Vayamos una dimensión más allá. En la figura 12.8a, consideramos sólo la superficie de las esferas. Imaginemos ahora que, como en la figura 12.8b, el tejido del espacio también incluye el interior de las esferas - nuestro pequeño gusano del tamaño de Planck puede escarbar en la esfera, como los gusanos ordinarios lo hacen con las manzanas, y moverse libremente por su interior. Para especificar la ubicación del gusano se necesitarían ahora *seis* datos: tres para localizar su posición en las dimensiones espaciales extendidas habituales, y tres más para localizar su posición en la esfera clavada en ese punto (latitud, longitud, profundidad de penetración). Junto con el tiempo, este es por lo tanto un ejemplo de un universo con *siete* dimensiones espacio-temporales.

Ahora viene un salto. Aunque es imposible de dibujar, imagina que en cada punto de las tres dimensiones extendidas de la vida cotidiana, el universo no tiene una dimensión extra como en la figura 12.7, ni dos dimensiones extra como en la figura 12.8a, ni tres dimensiones extra como en la figura 12.8b, sino seis dimensiones espaciales extra. Ciertamente no puedo visualizar esto y nunca he conocido a nadie que pueda. Pero su significado está claro. Para especificar la ubicación espacial de un gusano del tamaño de Planck en un universo así requiere *nueve* piezas de información: tres para localizar su posición en las dimensiones extendidas habituales y seis más para localizar su posición en las dimensiones enroscadas que se han fijado en ese punto. Si además se tiene en cuenta el tiempo, se trata de un universo de diez dimensiones espacio-temporales, tal y como requieren las ecuaciones de la teoría de cuerdas. Si las seis dimensiones adicionales se enroscan lo suficientemente pequeñas, fácilmente habrían escapado a la detección.

La forma de las dimensiones ocultas

Las ecuaciones de la teoría de cuerdas determinan más que el número de dimensiones espaciales. También determinan los tipos de formas que las dimensiones adicionales pueden asumir. [18] En las figuras de arriba, nos centramos en las formas más simples, círculos, esferas huecas, bolas sólidas, pero las ecuaciones de la teoría de cuerdas escogen una clase significativamente más complicada de formas de seis dimensiones conocidas como formas Calabi-Yau o espacios Calabi-Yau. Estas formas llevan el nombre de dos matemáticos, Eugenio Calabi y Shing-Tung Yau, que las descubrieron matemáticamente mucho antes de que se diera cuenta de su relevancia para la teoría de las cuerdas; en la figura 12.9a se muestra una ilustración aproximada de un ejemplo. Tenga en cuenta que en esta figura un gráfico bidimensional ilustra un objeto de seis dimensiones, y

esto da lugar a una variedad de distorsiones significativas. Aún así, la imagen da una idea aproximada del aspecto de estas formas. Si la forma particular de Calabi-Yau de la figura 12.9a constituyera las seis dimensiones adicionales de la teoría de cuerdas, en escalas ultramicroscópicas el espacio tendría la forma ilustrada en la figura 12.9b. Como la forma de Calabi-Yau estaría clavada en cada punto de las tres dimensiones habituales, usted y yo y todos los demás estaríamos ahora mismo rodeados y llenos de estas pequeñas formas. Literalmente, mientras caminas de un lugar a otro, tu cuerpo se movería a través de las nueve dimensiones, circunnavegando rápida y repetidamente toda la forma, en promedio haciendo que parezca que no te estás moviendo a través de las seis dimensiones adicionales en absoluto.

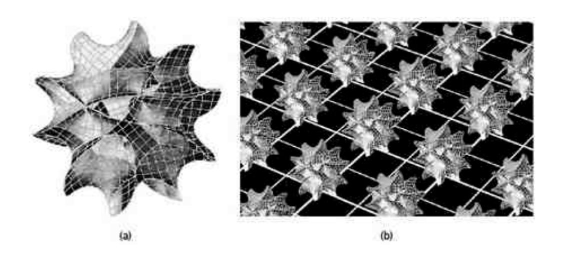


Figura 12.9: Un ejemplo de una forma Calabi-Yau. Una porción de espacio muy ampliada con dimensiones adicionales en forma de una diminuta forma de Calabi-Yau.

Si estas ideas son correctas, el tejido ultramicroscópico del cosmos está bordado con la más rica de las texturas.

Física de Cuerdas y Dimensiones Extra

La belleza de la relatividad general es que la física de la gravedad está controlada por la geometría del espacio. Con las dimensiones espaciales adicionales propuestas por la teoría de cuerdas, naturalmente se adivinaría que el poder de la geometría para determinar la física aumentaría sustancialmente. Y así es. Veamos primero esto tomando una pregunta que hasta ahora he eludido. ¿Por qué la teoría de cuerdas requiere diez dimensiones de espacio tiempo? Esta es una pregunta difícil de responder no matemáticamente, pero permítanme explicarles lo suficiente para ilustrar cómo se reduce a una interacción de la geometría y la física.

Imagina una cuerda que está obligada a vibrar sólo en la superficie bidimensional de una mesa plana. La cuerda será capaz de ejecutar una variedad de patrones de vibración, pero sólo aquellos que implican movimiento en las direcciones izquierda/derecha y atrás/adelante de la superficie de la mesa. Si la cuerda se libera para vibrar en la tercera dimensión, el movimiento en la dimensión

arriba/abajo que sale de la superficie de la mesa, los patrones de vibración adicionales se hacen accesibles. Ahora, aunque es difícil de imaginar en más de tres dimensiones, esta conclusión -más dimensiones significa más patrones de vibración- es general. Si una cuerda puede vibrar en una cuarta dimensión espacial, puede ejecutar más patrones de vibración de los que podría en sólo tres; si una cuerda puede vibrar en una quinta dimensión espacial, puede ejecutar más patrones de vibración de los que podría en sólo cuatro; y así sucesivamente. Esta es una realización importante, porque hay una ecuación en la teoría de las cuerdas que exige que el número de patrones de vibración independientes cumplan una restricción muy precisa. Si se viola la restricción, las matemáticas de la teoría de las cuerdas se desmoronan y sus ecuaciones pierden su sentido. En un universo con tres dimensiones espaciales, el número de patrones de vibración es demasiado pequeño y no se cumple la restricción; con cuatro dimensiones espaciales, el número de patrones de vibración sigue siendo demasiado pequeño; con cinco, seis, siete u ocho dimensiones sigue siendo demasiado pequeño; pero con nueve dimensiones espaciales, la restricción en el número de patrones de vibración se cumple perfectamente. Y así es como la teoría de las cuerdas determina el número de dimensiones espaciales.[36] [19]

Si bien esto ilustra bien la interacción de la geometría y la física, su asociación dentro de la teoría de las cuerdas va más allá y, de hecho, proporciona una manera de abordar un problema crítico que se encontró anteriormente. Recordemos que, al tratar de hacer un contacto detallado entre los patrones de vibración de las cuerdas y las especies de partículas conocidas, los físicos tuvieron problemas. Descubrieron que había demasiados patrones vibratorios de cuerda sin masa y, además, las propiedades detalladas de los patrones vibratorios no coincidían con las de las partículas de materia y fuerza conocidas. Pero lo que no mencioné antes, porque aún no habíamos discutido la idea de las dimensiones adicionales, es que aunque esos cálculos tenían en cuenta el *número* de dimensiones adicionales (lo que explica, en parte, por qué se encontraron tantos patrones de vibración de cuerda), no tenían en cuenta el pequeño tamaño y la *forma* compleja de las dimensiones adicionales -supusieron que todas las dimensiones del espacio eran planas y estaban totalmente desplegadas- y eso supone una diferencia sustancial.

Las cuerdas son tan pequeñas que incluso cuando las seis dimensiones adicionales se arrugan en una forma de Calabi-Yau, las cuerdas todavía vibran en esas direcciones. Por dos razones, eso es extremadamente importante. Primero, asegura que las cuerdas siempre vibran en las nueve dimensiones del espacio, y por lo tanto la limitación en el número de patrones de vibración continúa siendo satisfecha, incluso cuando las dimensiones adicionales están fuertemente acurrucadas. En segundo lugar, al igual que los patrones de vibración de las corrientes de aire que atraviesan una tuba se ven afectados por los giros y vueltas del instrumento, los patrones de vibración de las cuerdas se ven influidos por los giros y vueltas en la geometría de las seis dimensiones adicionales. Si se

cambiara la forma de una tuba haciendo un pasaje más estrecho o alargando una cámara, los patrones de vibración del aire y por lo tanto el sonido del instrumento cambiarían. Del mismo modo, si se modificara la forma y el tamaño de las dimensiones adicionales, las propiedades precisas de cada posible patrón de vibración de una cuerda también se verían significativamente afectadas. Y como el patrón vibratorio de una cuerda determina su masa y su carga, esto significa que las dimensiones adicionales juegan un papel fundamental en la determinación de las propiedades de las partículas.

Esta es una realización clave. *El tamaño y la forma precisos de la dimensión adicional tiene un profundo impacto en los patrones de vibración de las cuerdas y, por lo tanto, en las propiedades de las partículas.* Como la estructura básica del universo -desde la formación de galaxias y estrellas hasta la existencia de la vida tal como la conocemos- depende sensiblemente de las propiedades de las partículas, el código del cosmos bien podría estar escrito en la geometría de una forma de Calabi-Yau.

Vimos un ejemplo de una forma de Calabi-Yau en la figura 12.9, pero hay al menos cientos de miles de otras posibilidades. La pregunta, entonces, es qué forma de Calabi-Yau, si es que hay alguna, constituye la parte extra-dimensional del tejido espacio-tiempo. Esta es una de las preguntas más importantes a las que se enfrenta la teoría de las cuerdas, ya que sólo con una elección definitiva de la forma de Calabi-Yau se determinan las características detalladas de los patrones vibratorios de las cuerdas. Hasta la fecha, la pregunta sigue sin respuesta. La razón es que la comprensión actual de las ecuaciones de la teoría de las cuerdas no permite comprender cómo elegir una forma entre muchas; desde el punto de vista de las ecuaciones conocidas, cada forma de Calabi-Yau es tan válida como cualquier otra. Las ecuaciones ni siquiera determinan el tamaño de las dimensiones adicionales. Como no vemos las dimensiones adicionales, deben ser pequeñas, pero precisamente qué tan pequeñas sigue siendo una pregunta abierta.

¿Es un defecto fatal de la teoría de las cuerdas? Posiblemente. Pero no lo creo. Como veremos con más detalle en el próximo capítulo, las ecuaciones exactas de la teoría de las cuerdas han eludido a los teóricos durante muchos años y tanto trabajo ha utilizado ecuaciones *aproximadas*. Éstas han permitido comprender muchas características de la teoría de las cuerdas, pero para ciertas cuestiones, incluyendo el tamaño y la forma exacta de las dimensiones adicionales, las ecuaciones aproximadas se quedan cortas. A medida que continuamos afinando nuestro análisis matemático y mejorando estas ecuaciones aproximadas, la determinación de la forma de las dimensiones adicionales es un objetivo primordial y, en mi opinión, alcanzable. Hasta ahora, este objetivo sigue siendo inalcanzable.

Sin embargo, todavía podemos preguntarnos si *cualquier* elección de la forma de Calabi-Yau produce patrones de vibración de cuerda que se aproximan mucho a las partículas conocidas. Y aquí la respuesta es bastante gratificante.

Aunque estamos lejos de haber investigado todas las posibilidades, se han encontrado ejemplos de formas de Calabi-Yau que dan lugar a patrones de vibración de cuerdas, en concordancia aproximada con las Tablas 12.1 y 12.2. Por ejemplo, a mediados de la década de 1980 Philip Candelas, Gary Horowitz, Andrew Strominger y Edward Witten (el equipo de físicos que se dio cuenta de la importancia de las formas de Calabi-Yau para la teoría de las cuerdas) descubrieron que cada agujero -el término se utiliza en un sentido matemático precisamente definido- contenido dentro de una forma de Calabi-Yau da lugar a una *familia* de patrones de vibración de cuerda de la más baja energía. Por lo tanto, una forma de Calabi-Yau con tres agujeros proporcionaría una explicación para la estructura repetitiva de tres familias de partículas elementales en la Tabla 12.1. De hecho, se han encontrado varias de estas formas de Calabi-Yau de tres agujeros. Además, entre estas formas preferidas de Calabi-Yau se encuentran las que también producen el número justo de partículas mensajeras, así como las cargas eléctricas y las propiedades de la fuerza nuclear adecuadas para que coincidan con las partículas de las Tablas 12.1 y 12.2.

Este es un resultado extremadamente alentador; de ninguna manera se aseguró. Al fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica, la teoría de cuerdas podría haber logrado un objetivo sólo para encontrar imposible acercarse al objetivo igualmente importante de explicar las propiedades de la materia y las partículas de fuerza conocidas. Los investigadores se animan a creer que la teoría ha superado esa decepcionante posibilidad. Ir más allá y calcular las masas precisas de las partículas es significativamente más desafiante. Como discutimos, las partículas de las tablas 12.1 y 12.2 tienen masas que se desvían de las vibraciones de cuerda de menor energía -cero veces la masa de Planck- por menos de una parte en un millón de miles de millones. El cálculo de tales desviaciones infinitesimales requiere un nivel de precisión mucho más allá de lo que podemos reunir con nuestra actual comprensión de las ecuaciones de la teoría de cuerdas.

De hecho, sospecho, como muchos otros teóricos de cuerdas, que las diminutas masas de las tablas 12.1 y 12.2 surgen en la teoría de cuerdas de la misma manera que en el modelo estándar. Recordemos el capítulo 9 que en el modelo estándar, un campo de Higgs toma un valor distinto de cero en todo el espacio, y la masa de una partícula depende de cuánta fuerza de arrastre experimenta mientras atraviesa el océano de Higgs. Un escenario similar probablemente se desarrolla en la teoría de cuerdas. Si una enorme colección de cuerdas vibra de forma coordinada en todo el espacio, puede proporcionar un fondo uniforme que, a todos los efectos, sería indistinguible de un océano de Higgs. Las vibraciones de las cuerdas que inicialmente produjeron masa cero adquirirían entonces pequeñas

masas no nulas a través de la fuerza de arrastre que experimentan al moverse y vibrar a través de la versión de la teoría de cuerdas del océano de Higgs.

Nótese, sin embargo, que en el modelo estándar, la fuerza de arrastre experimentada por una partícula dada -y por lo tanto la masa que adquiere- se determina por medición experimental y se especifica como una entrada a la teoría. En la versión de la teoría de cuerdas, la fuerza de arrastre -y por lo tanto las masas de los patrones de vibración- se remontaría a las interacciones entre las cuerdas (ya que el océano de Higgs estaría hecho de cuerdas) y debería ser calculable. La teoría de cuerdas, al menos en principio, permite que todas las propiedades de las partículas estén determinadas por la propia teoría.

Nadie ha logrado esto, pero como se ha enfatizado, la teoría de cuerdas es todavía un trabajo en progreso. Con el tiempo, los investigadores esperan realizar plenamente el vasto potencial de este enfoque de la unificación. La motivación es fuerte porque la recompensa potencial es grande. Con trabajo duro y mucha suerte, la teoría de cuerdas puede algún día explicar las propiedades fundamentales de las partículas y, a su vez, explicar por qué el universo es como es.

El tejido del cosmos según la teoría de las cuerdas

Aunque mucho de la teoría de cuerdas aún está más allá de los límites de nuestra comprensión, ya ha expuesto nuevas y dramáticas perspectivas. Lo más sorprendente es que, al reparar la brecha entre la relatividad general y la mecánica cuántica, la teoría de cuerdas ha revelado que el tejido del cosmos puede tener muchas más dimensiones de las que percibimos directamente, dimensiones que pueden ser la clave para resolver algunos de los misterios más profundos del universo. Además, la teoría intimida que las nociones familiares de espacio y tiempo no se extienden al ámbito subplanckiano, lo que sugiere que el espacio y el tiempo tal como los entendemos actualmente pueden ser meras aproximaciones a conceptos más fundamentales que todavía esperan nuestro descubrimiento.

En los momentos iniciales del universo, estas características del tejido espacio-tiempo que, hoy en día, sólo pueden ser accedidas matemáticamente, se habrían manifestado. Al principio, cuando las tres dimensiones espaciales conocidas eran también pequeñas, probablemente habría habido poca o ninguna distinción entre lo que ahora llamamos las dimensiones grandes y las enroscadas de la teoría de cuerdas. Su disparidad de tamaño actual se debería a la evolución cosmológica que, de una manera que aún no comprendemos, habría tenido que elegir tres de las dimensiones espaciales como especiales, y someterlas sólo a los 14.000 millones de años de expansión discutidos en los capítulos anteriores. Si miramos aún más atrás en el tiempo, todo el universo observable se habría reducido al

dominio subplanckiano, de modo que lo que hemos denominado la mancha borrosa (en la figura 10.6), ahora podemos identificar como el reino donde el espacio y el tiempo familiares aún tienen que emerger de las entidades más fundamentales -lo que sea que sean- que la investigación actual está luchando por comprender.

Un mayor progreso en la comprensión del universo primordial, y por lo tanto en la evaluación del origen del espacio, del tiempo y de la flecha del tiempo, requiere un perfeccionamiento significativo de las herramientas teóricas que utilizamos para comprender la teoría de las cuerdas, un objetivo que, no hace mucho tiempo, parecía noble pero distante. Como veremos ahora, con el desarrollo de la teoría M, el progreso ha superado muchas de las predicciones más optimistas, incluso las de los optimistas.

13 - El Universo en una rama

ESPECULACIONES SOBRE EL ESPACIO Y EL TIEMPO EN LA M-TEORÍA

La teoría de las cuerdas tiene una de las historias más retorcidas de cualquier avance científico. Incluso hoy, más de tres décadas después de su articulación inicial, la mayoría de los practicantes de la teoría de las cuerdas creen que todavía no tenemos una respuesta completa a la pregunta rudimentaria, ¿Qué es la teoría de las cuerdas? Sabemos mucho sobre la teoría de las cuerdas. Conocemos sus características básicas, conocemos sus éxitos clave, sabemos la promesa que encierra y conocemos los desafíos a los que se enfrenta; también podemos utilizar las ecuaciones de la teoría de las cuerdas para hacer cálculos detallados de cómo deben comportarse e interactuar las cuerdas en una amplia gama de circunstancias. Pero la mayoría de los investigadores creen que nuestra actual formulación de la teoría de cuerdas todavía carece del tipo de principio básico que encontramos en el corazón de otros grandes avances. La relatividad especial tiene la constancia de la velocidad de la luz. La relatividad general tiene el principio de equivalencia. La mecánica cuántica tiene el principio de incertidumbre. Los teóricos de cuerdas continúan buscando un principio análogo que capte la esencia de la teoría tan completamente.

En gran medida, esta deficiencia existe porque la teoría de cuerdas se desarrolló de manera fragmentaria en lugar de surgir de una visión grandiosa y global. El *objetivo* de la teoría de las cuerdas, la unificación de todas las fuerzas y toda la materia en un marco de mecánica cuántica, es tan grande como se puede, pero la evolución de la teoría ha sido claramente fragmentada. Después de su descubrimiento fortuito hace más de tres décadas, la teoría de las cuerdas se ha ido consolidando a medida que un grupo de teóricos ha ido descubriendo

propiedades clave al estudiar *estas* ecuaciones, mientras que otro grupo ha revelado implicaciones críticas al *examinarlas.*

Los teóricos de cuerdas pueden ser comparados con una tribu primitiva excavando una nave espacial enterrada con la que han tropezado. Al jugar y manipular, la tribu establecería lentamente aspectos del funcionamiento de la nave espacial, y esto alimentaría la sensación de que todos los botones y botones funcionan juntos de manera coordinada y unificada. Un sentimiento similar prevalece entre los teóricos de cuerdas. Los resultados encontrados durante muchos años de investigación están encajando y convergiendo. Esto ha infundido una confianza creciente entre los investigadores en que la teoría de cuerdas se está acercando a un marco poderoso y coherente, que aún no se ha desenterrado completamente, pero que en última instancia expondrá el funcionamiento interno de la naturaleza con una claridad y amplitud sin igual.

En los últimos tiempos, nada ilustra mejor esto que la comprensión que desencadenó la *segunda revolución de las supercuerdas,* una revolución que, entre otras cosas, ha expuesto otra dimensión oculta entrelazada en el tejido espacial, ha abierto nuevas posibilidades para las pruebas experimentales de la teoría de las cuerdas, ha sugerido que nuestro universo puede estar rozando otros, ha revelado que pueden crearse agujeros negros en la próxima generación de aceleradores de alta energía, y ha llevado a una novedosa teoría cosmológica en la que el tiempo y su flecha, como el gracioso arco de los anillos de Saturno, pueden dar vueltas y vueltas.

La segunda revolución de las supercuerdas

Hay un detalle incómodo con respecto a la teoría de las cuerdas que aún no he divulgado, pero que los lectores de mi libro anterior, *El Universo Elegante,* pueden recordar. En las últimas tres décadas, no se han desarrollado una sino *cinco* versiones distintas de la teoría de las cuerdas. Aunque sus nombres no son esenciales, se llaman Tipo I, Tipo IIA, Tipo IIB, Heterotic-O y Heterotic-E. Todas comparten las características esenciales introducidas en el último capítulo -los ingredientes básicos son hebras de energía vibratoria- y, como revelaron los cálculos de los años setenta y ochenta, cada teoría requiere seis dimensiones espaciales adicionales; pero cuando se analizan en detalle, aparecen diferencias significativas. Por ejemplo, la teoría del Tipo I incluye los bucles de cuerda vibratoria discutidos en el último capítulo, las llamadas cuerdas *cerradas,* pero a diferencia de las otras teorías de cuerdas, también contiene cuerdas *abiertas, recortes de cuerda vibratoria* que tienen dos cabos sueltos. Además, los cálculos muestran que la lista de patrones de vibración de las cuerdas y la forma en que cada patrón interactúa e influye en otros difiere de una formulación a otra.

El más optimista de los teóricos de cuerdas previó que estas diferencias servirían para eliminar cuatro de las cinco versiones cuando algún día se pudieran realizar comparaciones detalladas con los datos experimentales. Pero, francamente, la mera existencia de cinco formulaciones diferentes de la teoría de cuerdas era una fuente de tranquila incomodidad. El sueño de la unificación es uno en el que los científicos son llevados a una teoría única del universo. Si la investigación estableciera que sólo un marco teórico puede abarcar tanto la mecánica cuántica como la relatividad general, los teóricos alcanzarían el nirvana de la unificación. Tendrían un fuerte argumento a favor de la validez del marco, incluso en ausencia de una verificación experimental directa. Después de todo, ya existe un gran apoyo experimental tanto para la mecánica cuántica como para la relatividad general, y parece claro como el día en que las leyes que rigen el universo deberían ser mutuamente compatibles. Si una teoría particular fuera el único arco matemáticamente consistente que abarca los dos pilares experimentalmente confirmados de la física del siglo XX, eso proporcionaría una poderosa, aunque indirecta, evidencia de la inevitabilidad de la teoría.

Pero el hecho de que haya cinco versiones de la teoría de las cuerdas, superficialmente similares pero distintas en detalle, parece significar que la teoría de las cuerdas falla en la prueba de unicidad. Incluso si los optimistas son algún día reivindicados y sólo una de las cinco teorías de cuerdas se confirma experimentalmente, todavía estaríamos molestos por la persistente pregunta de por qué hay otras cuatro formulaciones consistentes. ¿Serían las otras cuatro simplemente curiosidades matemáticas? ¿Tendrían algún significado para el mundo físico? ¿Podría ser su existencia la punta de un iceberg teórico en el que científicos inteligentes mostrarían posteriormente que hay en realidad otras cinco versiones, o seis, o siete, o tal vez incluso un sinfín de variaciones matemáticas distintas sobre un tema de cuerdas?

A finales del decenio de 1980 y principios del decenio de 1990, cuando muchos físicos se dedicaron con ahínco a comprender una u otra de las teorías de las cuerdas, el enigma de las cinco versiones no era un problema que los investigadores solían abordar a diario. En cambio, era una de esas preguntas tranquilas que todos suponían que se abordaría en un futuro lejano, cuando la comprensión de cada teoría de las cuerdas se hubiera perfeccionado considerablemente.

Pero en la primavera de 1995, con poca advertencia, estas modestas esperanzas fueron salvajemente superadas. Basándose en el trabajo de varios teóricos de cuerdas (incluyendo a Chris Hull, Paul Townsend, Ashoke Sen, Michael Duff, John Schwarz, y muchos otros), Edward Witten -quien durante dos décadas ha sido el teórico de cuerdas más renombrado del mundo- descubrió una unidad oculta que unía las cinco teorías de cuerdas. Witten demostró que en lugar de ser distintas, las cinco teorías son en realidad sólo cinco maneras diferentes de analizar matemáticamente una *sola* teoría. Por mucho que las traducciones de un libro a

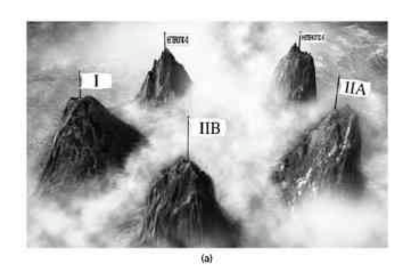
cinco idiomas diferentes puedan parecer, para un lector monolingüe, cinco textos distintos, las cinco formulaciones de las cuerdas parecían distintas sólo porque Witten aún no había escrito el diccionario para traducirlas entre ellas. Pero una vez revelado, el diccionario proporcionó una demostración convincente de que, como un único texto maestro del que se han hecho cinco traducciones, una única teoría maestra vincula las cinco formulaciones de las cuerdas. La teoría maestra unificadora ha sido tentativamente llamada Teoría M, siendo *M* un marcador de posición tentador cuyo significado - ¿Maestro? ¿Majestuoso? ¿Madre? ¿Mágico? ¿Misterio? Matrix... espera el resultado de un vigoroso esfuerzo de investigación mundial que busca completar la nueva visión iluminada por la poderosa perspicacia de Witten.

Este revolucionario descubrimiento fue un gratificante salto adelante. La teoría de las cuerdas, que Witten demostró en uno de los trabajos más preciados del campo (y en un importante trabajo de seguimiento con Petr Ho ava), *es* una teoría única. Los teóricos de cuerdas ya no tenían que calificar a su candidato para la teoría unificada que buscaba Einstein añadiendo, con un poco de vergüenza, que el marco unificado propuesto carecía de unidad porque venía en cinco versiones diferentes. Qué apropiado, por el contrario, que la propuesta de mayor alcance de una teoría unificada sea, en sí misma, el tema de una metaunificación. A través de la obra de Witten, la unidad que encarna cada teoría de cuerdas individual se extendió a todo el marco de cuerdas.

La figura 13.1 esboza el estado de las cinco teorías de la cuerda antes y después del descubrimiento de Witten, y es una buena imagen resumida para tener en cuenta. Ilustra que la teoría M no es un enfoque nuevo, per se, sino que, al despejar las nubes, promete una formulación más refinada y completa de la ley física que la que proporciona cualquiera de las teorías de cuerdas individuales. La Teoría M enlaza y abarca por igual las cinco teorías de cuerdas mostrando que cada una de ellas forma parte de una síntesis teórica más amplia.

El poder de la traducción

Aunque la figura 13.1 transmite esquemáticamente el contenido esencial del descubrimiento de Witten, expresado de esta manera puede parecer un poco de béisbol interior. Antes del descubrimiento de Witten, los investigadores pensaban que había cinco versiones distintas de la teoría de las cuerdas; después de su descubrimiento, no. Pero si nunca supiste que había cinco teorías de cuerdas supuestamente distintas, ¿por qué te importa que el más inteligente de los teóricos de cuerdas mostrara que no son distintas después de todo? En otras palabras, ¿por qué el descubrimiento de Witten fue revolucionario en lugar de una modesta visión que corregía un concepto erróneo anterior?



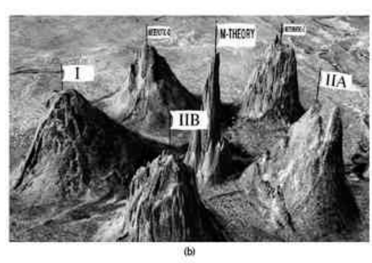


Figura 13.1: **Representación esquemática** de las cinco teorías de la cuerda, antes de 1995. de la metaunificación revelada por la teoría M.

Aquí está el porqué. En las últimas décadas, los teóricos de cuerdas han sido bloqueados repetidamente por un problema matemático. Debido a que las ecuaciones exactas que describen cualquiera de las cinco teorías de cuerdas han demostrado ser tan difíciles de extraer y analizar, los teóricos han basado gran parte de su investigación en ecuaciones aproximadas que son mucho más fáciles de trabajar. Aunque hay buenas razones para creer que las ecuaciones aproximadas deberían, en muchas circunstancias, dar respuestas cercanas a las que dan las ecuaciones verdaderas, las aproximaciones -como las traducciones- siempre se pierden algo. Por esta razón, ciertos problemas clave han demostrado estar más allá del alcance matemático de las ecuaciones aproximadas, impidiendo significativamente el progreso.

Por la imprecisión inherente a las traducciones textuales, los lectores tienen un par de remedios inmediatos. La mejor opción, si las habilidades lingüísticas del lector están a la altura, es consultar el manuscrito original. Por el momento, el análogo de esta opción no está disponible para los teóricos de las cuerdas. En virtud de la coherencia del diccionario elaborado por Witten y otros, tenemos pruebas fehacientes de que las cinco teorías de cuerdas son descripciones diferentes de una sola teoría maestra, la teoría M, pero los investigadores aún no han desarrollado una comprensión completa de este nexo teórico. Hemos aprendido mucho sobre la Teoría M en los últimos años, pero todavía nos queda mucho por hacer antes de que alguien pueda afirmar sensatamente que se comprende correcta o completamente. En la teoría de cuerdas, es como si tuviéramos cinco traducciones de un texto maestro aún por descubrir.

Otro remedio útil, bien conocido por los lectores de traducciones que no tienen el original (como en la teoría de las cuerdas) o, más comúnmente, no entienden el idioma en el que está escrito, es consultar varias traducciones del texto maestro en idiomas con los que están familiarizados. Los pasajes en los que las traducciones concuerdan dan confianza; los pasajes en los que difieren señalan posibles inexactitudes o destacan diferentes interpretaciones. Este es el enfoque que Witten puso a disposición con su descubrimiento de que las cinco teorías de cuerdas son diferentes traducciones de la misma teoría subyacente. De hecho, su descubrimiento proporcionó una versión extremadamente poderosa de esta línea de ataque que se entiende mejor a través de una ligera extensión de la analogía de la traducción.

Imaginen un manuscrito maestro impregnado de una gama tan enorme de juegos de palabras, rimas y bromas poco convencionales y sensibles a la cultura, que el texto completo no puede expresarse con gracia en ninguno de los cinco idiomas a los que se traduce. Algunos pasajes podrían traducirse al swahili con facilidad, mientras que otras partes podrían resultar completamente impenetrables en esta lengua. La traducción al inuit puede ayudar a comprender mejor algunos de estos últimos pasajes, mientras que en otras secciones la traducción puede ser completamente opaca. El sánscrito puede capturar la esencia de algunos de estos pasajes difíciles, pero en otras secciones particularmente problemáticas, las cinco traducciones pueden dejarte atónito y sólo el texto maestro será inteligible. Esto se acerca mucho más a la situación de las cinco teorías de cuerdas. Los teóricos han encontrado que para ciertas preguntas, una de las cinco puede dar una descripción transparente de las implicaciones físicas, mientras que las descripciones dadas por las otras cuatro son demasiado complejas matemáticamente para ser útiles. Y ahí reside el poder del descubrimiento de Witten. Antes de su descubrimiento, los investigadores de la teoría de cuerdas que se encontraban con ecuaciones intratables se quedaban atascados. Pero el trabajo de Witten demostró que cada una de estas preguntas admite cuatro traducciones matemáticas, cuatro reformulaciones matemáticas, y a veces una de las preguntas reformuladas resulta mucho más sencilla de responder. Así, *el*

diccionario para traducir entre las cinco teorías puede a veces proporcionar un medio para traducir preguntas imposiblemente difíciles en otras comparativamente simples.

No es a prueba de tontos. Así como las cinco traducciones de ciertos pasajes en ese texto maestro pueden ser igualmente incomprensibles, a veces las descripciones matemáticas dadas por las cinco teorías de cuerdas son igualmente difíciles de entender. En tales casos, al igual que necesitaríamos consultar el propio texto original, necesitaríamos una comprensión completa de la escurridiza teoría M para progresar. Aún así, en una gran cantidad de circunstancias, el diccionario de Witten ha proporcionado una nueva y poderosa herramienta para analizar la teoría de cuerdas.

Por lo tanto, así como cada traducción de un texto complejo sirve para un propósito importante, cada formulación de cadena también lo hace. Combinando los conocimientos adquiridos desde la perspectiva de cada una, somos capaces de responder a las preguntas y revelar características que están completamente fuera del alcance de cualquier formulación de cuerda única. El descubrimiento de Witten dio a los teóricos cinco veces la potencia de fuego para avanzar en la primera línea de la teoría de cuerdas. Y eso, en gran parte, es por lo que provocó una revolución.

Once dimensiones

Entonces, con nuestro recién descubierto poder para analizar la teoría de las cuerdas, ¿qué conocimientos han surgido? Ha habido muchos. Me centraré en aquellos que han tenido el mayor impacto en la historia del espacio y el tiempo.

De primordial importancia, el trabajo de Witten reveló que las ecuaciones aproximadas de la teoría de cuerdas utilizadas en los años 70 y 80 para concluir que el universo debe tener nueve dimensiones espaciales no alcanzaron *el número verdadero por uno.* La respuesta exacta, según su análisis, es que el universo según la teoría M tiene diez dimensiones espaciales, es decir, once dimensiones espacio-temporales. De la misma manera que Kaluza descubrió que un universo con cinco dimensiones espacio-temporales proporcionaba un marco para unificar el electromagnetismo y la gravedad, y de la misma manera que los teóricos de cuerdas descubrieron que un universo con diez dimensiones espacio-temporales proporcionaba un marco para unificar la mecánica cuántica y la relatividad general, Witten descubrió que un universo con once dimensiones espacio-temporales proporcionaba un marco para unificar todas las teorías de cuerdas. Al igual que cinco pueblos que parecen, vistos desde el nivel del suelo, estar completamente separados, pero que, vistos desde la cima de una montaña -utilizando una dimensión vertical adicional- parecen estar conectados por una red

de caminos y carreteras, la dimensión espacial adicional que surgió del análisis de Witten fue crucial para encontrar conexiones entre las cinco teorías de cuerdas.

Aunque el descubrimiento de Witten seguramente encaja en el patrón histórico de lograr la unidad a través de más dimensiones, cuando anunció el resultado en la conferencia anual internacional de la teoría de cuerdas en 1995, sacudió los cimientos del campo. Los investigadores, incluyéndome a mí, habían pensado mucho sobre las ecuaciones aproximadas que se estaban utilizando, y todos confiaban en que los análisis habían dado la última palabra sobre el número de dimensiones. Pero Witten reveló algo sorprendente.

Demostró que todos los análisis anteriores habían hecho una simplificación matemática equivalente a *asumir* que una décima dimensión espacial hasta ahora no reconocida sería extremadamente pequeña, mucho más pequeña que todas las demás. Tan pequeña, de hecho, que las ecuaciones aproximadas de la teoría de cuerdas que todos los investigadores estaban usando carecían del poder de resolución para revelar incluso un indicio matemático de la existencia de la dimensión. Y eso llevó a todos a concluir que la teoría de las cuerdas sólo tenía nueve dimensiones espaciales. Pero con los nuevos conocimientos del marco teórico unificado de la M, Witten pudo ir más allá de las ecuaciones aproximadas, explorar más finamente y demostrar que una dimensión espacial había sido pasada por alto todo el tiempo. Así, Witten demostró que los cinco marcos de diez dimensiones que los teóricos de cuerdas habían desarrollado durante más de una década eran en realidad cinco descripciones aproximadas de una única teoría de once dimensiones subyacente.

Se preguntará si esta inesperada realización invalidó el trabajo previo en la teoría de cuerdas. En general, no lo hizo. La recién descubierta décima dimensión espacial añadió un rasgo inesperado a la teoría, pero si la teoría de cuerdas es correcta, y si la décima dimensión espacial resultara ser mucho más pequeña que todas las demás -como, durante mucho tiempo, se había supuesto sin querer- los trabajos anteriores seguirían siendo válidos. Sin embargo, debido a que las ecuaciones conocidas todavía no pueden determinar los tamaños o formas de las dimensiones adicionales, los teóricos de cuerdas han dedicado muchos esfuerzos en los últimos años a investigar la nueva posibilidad de una décima dimensión espacial no tan pequeña. Entre otras cosas, los amplios resultados de estos estudios han puesto la ilustración esquemática del poder unificador de la teoría M, figura 13.1, sobre una firme base matemática.

Sospecho que la actualización de diez a once dimensiones, a pesar de su gran importancia para la estructura matemática de la teoría de las cuerdas/M, no altera sustancialmente la imagen que tu mente tiene de la teoría. Para todos, excepto para los conocedores, tratar de imaginar siete dimensiones enroscadas es un ejercicio que es más o menos lo mismo que tratar de imaginar seis.

Pero una segunda y muy relacionada visión de la segunda revolución de las supercuerdas altera la imagen intuitiva básica de la teoría de las cuerdas. Las ideas colectivas de varios investigadores -Witten, Duff, Hull, Townsend, y muchos otros- establecieron que la teoría de cuerdas *no es sólo una teoría de las cuerdas.*

Branes

Una pregunta natural, que se le pudo haber ocurrido en el último capítulo, es *¿Por qué las cuerdas?* ¿Por qué los ingredientes unidimensionales son tan especiales? Al reconciliar la mecánica cuántica y la relatividad general, encontramos crucial que las cuerdas no sean puntos, que tengan un tamaño distinto de cero. Pero ese requisito puede cumplirse con ingredientes bidimensionales con forma de discos en miniatura o Frisbees, o con ingredientes tridimensionales con forma de bolas de béisbol o trozos de arcilla. O, ya que la teoría tiene tal abundancia de dimensiones espaciales, podemos incluso imaginar manchas con más dimensiones aún. ¿Por qué estos ingredientes no juegan ningún papel en nuestras teorías fundamentales?

En los años 80 y principios de los 90, la mayoría de los teóricos de cuerdas tenían lo que parecía una respuesta convincente. Argumentaban que *había* habido intentos de formular una teoría fundamental de la materia basada en componentes de tipo blob por parte de, entre otros, iconos de la física del siglo XX como Werner Heisenberg y Paul Dirac. Pero su trabajo, así como muchos estudios posteriores, demostraron que era extremadamente difícil desarrollar una teoría basada en diminutas manchas que cumpliera con los requisitos físicos más básicos, por ejemplo, asegurar que todas las probabilidades de la mecánica cuántica se situaran entre 0 y 1 (no se puede dar sentido a las probabilidades negativas o a las probabilidades superiores a 1), y eliminar la comunicación más rápida que la luz.

En cuanto a las partículas puntuales, medio siglo de investigaciones iniciadas en la década de 1920 mostraron que estas condiciones podían cumplirse (siempre y cuando se ignorara la gravedad). Y, para la década de 1980, más de una década de investigación por parte de Schwarz, Scherk, Green y otros establecieron, para sorpresa de la mayoría de los investigadores, que las condiciones también podían cumplirse para los ingredientes unidimensionales, las cuerdas (que necesariamente *incluían* la gravedad). Pero parecía imposible proceder a ingredientes fundamentales con dos o más dimensiones espaciales. La razón, en pocas palabras, es que el número de simetrías respetadas por las ecuaciones alcanza un enorme pico para los objetos unidimensionales (cuerdas) y desciende precipitadamente a partir de entonces. Las simetrías en cuestión son más abstractas que las discutidas en el Capítulo 8 (tienen que ver con la forma en que cambian las ecuaciones si, al estudiar el movimiento de una cuerda o un ingrediente de mayor dimensión, nos acercamos o alejamos, cambiando repentina y arbitrariamente la resolución de nuestras observaciones). Estas transformaciones resultan críticas para formular un conjunto de ecuaciones físicamente sensatas, y más allá de las cuerdas parecía que la fecundidad requerida de las simetrías estaba ausente.[1]

Por lo tanto, fue otro choque para la mayoría de los teóricos de cuerdas cuando el trabajo de Witten y una avalancha de resultados posteriores [2] llevaron a la realización de que la teoría de cuerdas, y el marco teórico M al que ahora pertenece, *contiene* ingredientes además de las cuerdas. Los análisis mostraron que hay objetos bidimensionales llamados, naturalmente, *membranas* (otro posible significado de la "M" en la teoría M) o, por deferencia, nombrando sistemáticamente a sus primos de dimensiones superiores*, las dos membranas.* Hay objetos de tres dimensiones espaciales llamados tres-branas*.* Y, aunque cada vez es más difícil de visualizar, los análisis mostraron que también hay objetos con dimensiones espaciales *p, en los que p* puede ser cualquier número entero inferior a 10, conocidos -sin ninguna derogación prevista- como *p-branas.* Por lo tanto, las cuerdas son sólo un ingrediente en la teoría de cuerdas, no *el* ingrediente.

Estos otros ingredientes escaparon a la investigación teórica anterior por la misma razón que la décima dimensión espacial: las ecuaciones de cuerda aproximadas resultaron ser demasiado burdas para revelarlas. En los contextos teóricos que los investigadores de cuerdas habían investigado matemáticamente, resulta que todas las *p- branas* son significativamente más pesadas que las cuerdas. Y cuanto más masivo es algo, más energía se requiere para producirlo. Pero una limitación de las ecuaciones de cuerda aproximadas -una limitación incrustada en las ecuaciones y bien conocida por todos los teóricos de cuerdas- es que se vuelven cada vez menos precisas al describir entidades y procesos que implican más y más energía. En las energías extremas relevantes para las *p- branas*, las ecuaciones aproximadas carecían de la precisión para exponer las branas que acechaban en las sombras, y por eso pasaron décadas sin que se notara su presencia en las matemáticas. Pero con las diversas reformulaciones y los nuevos

enfoques proporcionados por el marco teórico unificado de la M, los investigadores fueron capaces de eludir algunos de los obstáculos técnicos anteriores, y allí, a plena vista matemática, encontraron toda una panoplia de ingredientes de dimensiones superiores.[3]

La revelación de que hay otros ingredientes además de las cuerdas en la teoría de las cuerdas no invalida o hace obsoleto el trabajo anterior más de lo que lo hizo el descubrimiento de la décima dimensión espacial. La investigación muestra que si las branas de dimensiones superiores son mucho más masivas que las cuerdas -como se había asumido sin saberlo en estudios anteriores- tienen un impacto mínimo en una amplia gama de cálculos teóricos. Pero así como la décima dimensión espacial no tiene que ser mucho más pequeña que todas las demás, las ramas de mayor dimensión no tienen que ser mucho más pesadas. Hay una variedad de circunstancias, aún hipotéticas, en las que la masa de una brana de mayor dimensión puede estar a la par con los patrones vibratorios de las cuerdas de menor masa, y en tales casos la brana tiene un impacto significativo en la física resultante. Por ejemplo, mi propio trabajo con Andrew Strominger y David Morrison mostró que una brana puede envolverse alrededor de una porción esférica de una forma Calabi-Yau, muy similar a la envoltura plástica sellada al vacío alrededor de un pomelo; si esa porción de espacio se encogiera, la brana envuelta también se encogería, causando que su masa disminuya. Esta disminución de la masa, pudimos mostrar, permite que la porción de espacio colapse completamente y se abra - el espacio en sí puede romperse - mientras que la brana envuelta asegura que no haya consecuencias físicas catastróficas. Discutiré este desarrollo en detalle en *El Universo Elegante* y volveré brevemente a él cuando discutamos el viaje en el tiempo en el capítulo 15, así que no me extenderé más aquí. Pero este recorte deja claro cómo las branas de mayor dimensión pueden tener un efecto significativo en la física de la teoría de cuerdas.

Para nuestro enfoque actual, sin embargo, hay otra forma profunda en que las branas impactan la visión del universo según la teoría de la cuerda/M. La gran extensión del cosmos, la totalidad del espacio tiempo del que somos conscientes, puede no ser nada más que una enorme "brana". El nuestro puede ser un mundo de salvado.

Braneworlds

Probar la teoría de las cuerdas es un desafío porque las cuerdas son ultra pequeñas. Pero recuerden la física que determinó el tamaño de las cuerdas. La partícula mensajera de la gravedad -el gravitón- está entre los patrones vibratorios de cuerda de más baja energía, y la fuerza de la fuerza gravitatoria que comunica es proporcional a la longitud de la cuerda. Dado que la gravedad es una fuerza tan débil, la longitud de la cuerda debe ser diminuta; los cálculos muestran que debe

estar dentro de un factor de un centenar o así de la longitud de Planck para que el patrón vibratorio del gravitón de la cuerda comunique una fuerza gravitatoria con la fuerza observada.

Dada esta explicación, vemos que una cuerda de alta energía no está obligada a ser diminuta, ya que ya no tiene ninguna conexión directa con la partícula de gravitón (el gravitón es un patrón vibratorio de *baja* energía y masa cero). De hecho, a medida que se bombea más y más energía a una cuerda, al principio vibrará más y más frenéticamente. Pero después de cierto punto, la energía adicional tendrá un efecto diferente: hará que la longitud de la cuerda aumente, y no hay límite para el tiempo que puede crecer. Al bombear suficiente energía en una cuerda, podrías incluso hacerla crecer hasta un tamaño macroscópico. Con la tecnología actual no podríamos acercarnos a esto, pero es posible que en las secuelas extremadamente calientes y energéticas del big bang, se hayan producido cuerdas largas. Si algunos han logrado sobrevivir hasta hoy, podrían muy bien extenderse claramente a través del cielo. Aunque es una posibilidad remota, es incluso posible que esas largas cuerdas puedan dejar pequeñas pero detectables huellas en los datos que recibimos del espacio, quizás permitiendo que la teoría de las cuerdas sea confirmada algún día a través de observaciones astronómicas.

Las *p- branas de dimensiones* superiores tampoco tienen por qué ser diminutas, y como tienen más dimensiones que las cuerdas, se abre una posibilidad cualitativamente nueva. Cuando imaginamos una larga, quizás infinitamente larga, cuerda, imaginamos un largo objeto unidimensional que existe dentro de las tres grandes dimensiones espaciales de la vida cotidiana. Una línea eléctrica estirada hasta donde el ojo puede ver proporciona una imagen razonable. De manera similar, si imaginamos una gran -quizás infinitamente grande- dosbrana, imaginamos una gran superficie bidimensional que existe dentro de las tres grandes dimensiones espaciales de la experiencia común. No conozco una analogía realista, pero una ridícula y enorme pantalla de autocine, extremadamente delgada pero tan alta y ancha como el ojo puede ver, ofrece una imagen visual para sujetarse. Sin embargo, cuando se trata de un gran trío, nos encontramos en una situación cualitativamente nueva. Una triple bruna tiene tres dimensiones, así que si fuera grande, tal vez infinitamente grande, *llenaría*las tres grandes dimensiones espaciales. Mientras que una bruna y una doble, como la línea eléctrica y la pantalla de cine, son objetos que existen *dentro de* nuestras tres grandes dimensiones espaciales, una gran triple bruna ocuparía todo el espacio del que somos conscientes.

Esto plantea una posibilidad intrigante. ¿Podríamos, en este momento, estar viviendo dentro de una tresbrana? Como Blancanieves, cuyo mundo existe dentro de una pantalla de cine bidimensional -una doble rama- que a su vez reside en un universo de dimensiones superiores (las tres dimensiones espaciales del cine), ¿podría todo lo que conocemos existir dentro de una pantalla tridimensional -una

triple rama- que a su vez reside en el universo de dimensiones superiores de la teoría de las cuerdas? ¿Podría ser que lo que Newton, Leibniz, Mach y Einstein llamaron espacio tridimensional sea en realidad una entidad tridimensional particular en la teoría de cuerdas? O, en un lenguaje más relativista, ¿podría ser que el espacio tiempo cuatridimensional desarrollado por Minkowski y Einstein sea en realidad la estela de una triple brana a medida que evoluciona a través del tiempo? En resumen, ¿podría el universo tal como lo conocemos ser una brana?[4]

La posibilidad de que estemos viviendo dentro de un escenario de tres ramas, el llamado escenario de un *mundo de marcas,* es el último giro en la historia de la teoría de las cuerdas. Como veremos, proporciona una forma cualitativamente nueva de pensar en la Teoría de las cuerdas, con numerosas y amplias ramificaciones. La física esencial es que las branas son como el velcro cósmico; de una manera particular que discutiremos ahora, son muy pegajosas.

y cuerdas vibratorias

Una de las motivaciones para introducir el término "Teoría M" es que ahora nos damos cuenta de que la "teoría de las cuerdas" destaca sólo uno de los muchos ingredientes de la teoría. Los estudios teóricos revelaron cuerdas unidimensionales décadas antes de que análisis más refinados descubrieran las branas de mayor dimensión, por lo que la "teoría de cuerdas" es algo así como un artefacto histórico. Pero, aunque la teoría M exhibe una democracia en la que se representan objetos extendidos de una variedad de dimensiones, las cuerdas todavía juegan un papel central en nuestra formulación actual. En cierto modo esto es inmediatamente claro. Cuando todas las *p- branas de dimensiones superiores* son mucho más pesadas que las cuerdas, pueden ser ignoradas, como los investigadores han hecho sin saberlo desde los años 70. Pero hay otra forma más general en la que las cuerdas son las primeras entre los iguales.

En 1995, poco después de que Witten anunciara su avance, Joe Polchinski de la Universidad de California en Santa Bárbara se puso a pensar. Años antes, en un artículo que había escrito con Robert Leigh y Jin Dai, Polchinski había descubierto una interesante aunque bastante oscura característica de la teoría de las cuerdas. La motivación y el razonamiento de Polchinski eran algo técnico y los detalles no son esenciales para nuestra discusión, pero sus resultados sí. Encontró que en ciertas situaciones los puntos finales de las cuerdas abiertas - recuerden, son segmentos de cuerda con dos extremos sueltos - no serían capaces de moverse con total libertad. En cambio, así como una cuenta en un cable es libre de moverse, pero debe seguir el contorno del cable, y así como un pinball es libre de moverse, pero debe seguir los contornos de la superficie de la mesa de pinball, los puntos finales de una cuerda abierta serían libres de moverse pero estarían restringidos a formas o contornos particulares en el espacio. Mientras que la

cuerda todavía estaría libre para vibrar, Polchinski y sus colaboradores mostraron que sus puntos finales estarían "atascados" o "atrapados" dentro de ciertas regiones.

En algunas situaciones, la región podría ser unidimensional, en cuyo caso los puntos finales de la cuerda serían como dos cuentas que se deslizan en un cable, siendo la propia cuerda como un cordón que las conecta. En otras situaciones, la región podría ser bidimensional, en cuyo caso los puntos finales de la cuerda serían muy parecidos a dos pinballs conectados por un cable, rodando alrededor de una mesa de pinballs. En otras situaciones, la región podría tener tres, cuatro o cualquier otro número de dimensiones espaciales inferiores a diez. Estos resultados, tal como los mostraron Polchinski y también Petr Ho ava y Michael Green, ayudaron a resolver un viejo rompecabezas en la comparación de cuerdas abiertas y cerradas, pero a lo largo de los años, el trabajo atrajo una atención limitada.[5] En octubre de 1995, cuando Polchinski terminó de repensar estas ideas anteriores a la luz de los nuevos descubrimientos de Witten, eso cambió.

Una pregunta que el anterior artículo de Polchinski dejó sin una respuesta completa es una que se le pudo haber ocurrido al leer el último párrafo: Si los puntos finales de las cuerdas abiertas están atascados dentro de una región particular del espacio, ¿a *qué están atascado*? Las cuerdas y las máquinas de pinball tienen una existencia tangible independiente de las cuentas o bolas que están restringidas a moverse a lo largo de ellas. ¿Qué hay de las regiones del espacio a las que están restringidos los puntos finales de las cuerdas abiertas? ¿Están llenas de algún ingrediente independiente y fundamental de la teoría de las cuerdas, uno que agarra celosamente los puntos finales de las cuerdas abiertas? Antes de 1995, cuando se pensaba que la teoría de cuerdas era sólo una teoría de cuerdas, no parecía haber ningún candidato para el trabajo. Pero después del avance de Witten y el torrente de resultados que inspiró, la respuesta se hizo obvia para Polchinski: si los puntos finales de las cuerdas abiertas están restringidos para moverse dentro de alguna región *p-dimensional* del espacio, entonces esa región del espacio debe ser ocupada por una *p-* brana. [37] Sus cálculos mostraron que las recién descubiertas *p-* branas tenían exactamente las propiedades correctas para ser los objetos que ejercen un agarre irrompible sobre los puntos finales de las cuerdas abiertas, restringiéndolos para moverse dentro de la región p- dimensional del espacio que ocupan.

Para tener una mejor idea de lo que esto significa, mira la figura 13.2. En (a), vemos un par de dos bridas con un montón de cuerdas abiertas moviéndose y vibrando, todas con sus puntos finales restringidos al movimiento a lo largo de sus respectivas branas. Aunque cada vez es más difícil de dibujar, la situación con las branas de mayor dimensión es idéntica. Los puntos finales de las cuerdas abiertas pueden moverse libremente sobre y dentro de la *p-brana*, pero no pueden dejar la propia brasa. Cuando se trata de la posibilidad de movimiento fuera de una brana, las branas son las cosas más pegajosas imaginables. También es posible que un

extremo de una cuerda abierta se pegue a una *p- brana* y que su otro extremo se pegue a una *p-* brana diferente, una que puede tener la misma dimensión que la primera (Figura 13.2b) o no (Figura 13.2c).

Al descubrimiento de Witten de la conexión entre las diversas teorías de cuerdas, el nuevo trabajo de Polchinski proporcionó un manifiesto compañero para la segunda revolución de las supercuerdas. Mientras que algunas de las grandes mentes de la física teórica del siglo XX habían luchado y fracasado en la formulación de una teoría que contenía ingredientes fundamentales con más dimensiones que puntos (dimensiones cero) o cuerdas (una dimensión), los resultados de Witten y Polchinski, junto con importantes ideas de muchos de los principales investigadores de hoy en día, revelaron el camino del progreso. No sólo estos físicos establecieron que la teoría de las cuerdas/M contiene ingredientes de mayor dimensión, sino que los conocimientos de Polchinski en particular proporcionaron un medio para analizar teóricamente sus detalladas propiedades físicas (en caso de que llegaran a existir). Las propiedades de una brana, argumentó Polchinski, son capturadas en gran medida por las propiedades de las cuerdas abiertas vibratorias cuyos puntos finales contiene. Así como se puede aprender mucho sobre una alfombra pasando la mano por su montón - los trozos de lana cuyos puntos finales están unidos al respaldo de la alfombra - muchas cualidades de una brana pueden determinarse estudiando las cuerdas cuyos puntos finales agarra.

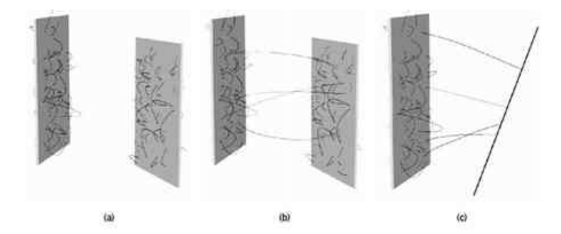


Figura 13.2 abiertas con puntos finales unidos a branas bidimensionales, o dos bridas. que se extienden de una rama bidimensional a otra. a una rama única.

Ese fue un resultado primordial. Demostró que décadas de investigación que produjeron métodos matemáticos agudos para estudiar objetos unidimensionales - cuerdas- podían usarse para estudiar objetos de dimensiones más altas, *p-*branas. Maravillosamente, entonces, Polchinski reveló que el análisis de los objetos de mayor dimensión se redujo, en gran medida, al completamente familiar, aunque todavía hipotético, análisis de las cuerdas. Es en este sentido que las cuerdas son especiales entre iguales. Si entiendes el comportamiento de las cuerdas, estás muy lejos de entender el comportamiento de las *p-branas*.

Con estas ideas, volvamos al escenario de un mundo de marca, la posibilidad de que todos vivamos nuestras vidas dentro de una triple marca.

Nuestro universo como una rama

Si estamos viviendo dentro de una triple rama - si nuestro espacio tiempo cuatridimensional no es más que la historia barrida por una triple rama a través del tiempo - entonces la venerable pregunta de si el espacio tiempo es un algo sería lanzada bajo una nueva y brillante luz. El familiar espacio tiempo cuatridimensional surgiría de una entidad física real en la teoría de las cuerdas/M, una triple rama, no de una idea vaga o abstracta. En este enfoque, la realidad de nuestro espacio tiempo cuatridimensional estaría a la par con la realidad de un electrón o un quark. (Por supuesto, todavía se podría preguntar si el espacio tiempo más grande dentro del cual existen las cuerdas y las branas - las once dimensiones de la teoría de las cuerdas/M - es en sí mismo una entidad; sin embargo, la realidad de la arena del espacio tiempo que experimentamos directamente se haría evidente). Pero si el universo del que somos conscientes es realmente de tres bridas, ¿no revelaría siquiera una mirada casual que estamos inmersos en algo, en el interior de las tres bridas?

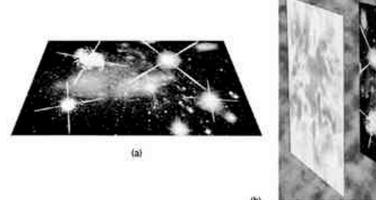
Bueno, ya hemos aprendido de cosas dentro de las cuales la física moderna sugiere que podemos estar inmersos - un océano de Higgs, un espacio lleno de energía oscura, una miríada de fluctuaciones de campo cuántico - ninguna de las cuales se hace directamente aparente a las percepciones humanas sin ayuda. Así que no debería ser un shock aprender que la teoría de la cuerda/M añade otro candidato a la lista de cosas invisibles que pueden llenar el espacio "vacío". Pero no nos pongamos arrogantes. Para cada una de las posibilidades anteriores, entendemos su impacto en la física y cómo podríamos establecer que realmente existe. De hecho, para dos de las tres fluctuaciones de energía oscura y cuántica, hemos visto que ya se han reunido fuertes pruebas que apoyan su existencia; se están buscando pruebas para el campo de Higgs en los aceleradores actuales y futuros. Entonces, ¿cuál es la situación correspondiente para la vida dentro de una triple bruna? Si el escenario del mundo de las branas es correcto, ¿por qué no vemos la triple corona, y cómo estableceríamos que existe?

La respuesta destaca cómo las implicaciones físicas de la cuerda/M-TEORIA en el contexto del mundo de las marcas difieren radicalmente de los anteriores escenarios "sin marcas" (o, como a veces se les llama cariñosamente, sin marcas). Consideremos, como un ejemplo importante, el movimiento de la luz, el movimiento de los fotones. En la teoría de las cuerdas, un fotón, como ya se sabe, es un patrón de vibración de cuerda particular. Más específicamente, los estudios matemáticos han demostrado que en el escenario del mundo de las cuerdas, sólo las vibraciones de las cuerdas abiertas, no las cerradas, producen fotones, y esto hace una gran diferencia. Los puntos finales de las cuerdas abiertas están obligados a moverse dentro de la triple corona, pero por lo demás son completamente libres. Esto implica que los fotones (cuerdas abiertas que ejecutan el modo de vibración de los fotones) viajarían sin ninguna restricción u obstrucción

a través de nuestra triple corona. Y eso haría que la membrana pareciera *invisible, impidiéndonos así ver* que estamos inmersos en ella.

De igual importancia, debido a que los puntos finales de las cuerdas abiertas no pueden salir de una brana, no pueden moverse hacia las dimensiones adicionales. Al igual que el cable restringe sus cuentas y la máquina de pinball restringe sus bolas, nuestra pegajosa triple brana permitiría a los fotones moverse *sólo* dentro de nuestras tres dimensiones espaciales. Dado que los fotones son las partículas mensajeras del electromagnetismo, esto implica que la fuerza electromagnética - la luz - quedaría atrapada dentro de nuestras tres dimensiones, como se ilustra (en dos dimensiones para que podamos dibujarla) en la figura 13.3.

Esa es una intensa realización con importantes consecuencias. Anteriormente, requerimos que las dimensiones adicionales de la teoría de la cuerda/M se enroscaran fuertemente. La razón, claramente, es que no vemos las dimensiones adicionales y por lo tanto deben ser ocultadas. Y una forma de ocultarlas es hacerlas más pequeñas de lo que nosotros o nuestros equipos pueden detectar. Pero ahora vamos a reexaminar este tema en el escenario del mundo de las marcas. ¿Cómo detectamos las cosas? Bueno, cuando usamos nuestros ojos, usamos la fuerza electromagnética; cuando usamos instrumentos poderosos como los microscopios electrónicos, también usamos la fuerza electromagnética; cuando usamos los rompedores de átomos, una de las fuerzas que usamos para sondear el ultrapequeño es, una vez más, la fuerza electromagnética. Pero si la fuerza electromagnética está confinada a nuestras tres bridas, nuestras tres dimensiones espaciales, es *incapaz* de sondear las dimensiones adicionales, independientemente de su tamaño. Los fotones no pueden escapar de nuestras dimensiones, entrar en las dimensiones adicionales, y luego viajar de vuelta a nuestros ojos o equipo permitiéndonos detectar las dimensiones adicionales, *incluso si fueran tan grandes como las dimensiones espaciales familiares.*



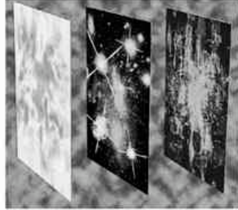


Figura 13.3 En el escenario del mundo de las branas, los fotones son cuerdas abiertas con puntos finales atrapados dentro de la brana, por lo que la luz no puede salir de la propia brana. Nuestro mundo de marca podría estar flotando en una gran extensión de dimensiones adicionales que permanecen invisibles para nosotros, porque la luz que vemos no puede salir de nuestra marca. También podría haber otros mundos brana flotando cerca.

Así que, si vivimos en una triple corona, hay una explicación alternativa de por qué no somos conscientes de las dimensiones adicionales. No es necesariamente que las dimensiones adicionales sean extremadamente pequeñas. Podrían ser grandes. No las vemos por la *forma en* que las vemos. Vemos usando la fuerza electromagnética, que es incapaz de acceder a ninguna dimensión más allá de las tres que conocemos. Como una hormiga caminando por una almohadilla de lirios, completamente inconsciente de las aguas profundas que yacen justo debajo de la superficie visible, podríamos estar flotando dentro de un gran espacio expansivo de dimensiones más altas, como en la figura 13.3b, pero la fuerza electromagnética, atrapada eternamente dentro de nuestras dimensiones, sería incapaz de revelar esto.

Bien, se podría decir, pero la fuerza electromagnética es sólo una de las cuatro fuerzas de la naturaleza. ¿Qué hay de las otras tres? ¿Pueden investigar las dimensiones adicionales, permitiéndonos así revelar su existencia? Para las fuerzas nucleares fuertes y débiles, la respuesta es, de nuevo, no. En el escenario del mundo de las marcas, los cálculos muestran que las partículas mensajeras de estas fuerzas -gluones y partículas W y Z- también surgen de patrones vibratorios de cuerda abierta, por lo que están tan atrapadas como los fotones, y los procesos que implican las fuerzas nucleares fuertes y débiles son igual de ciegos a las dimensiones adicionales. Lo mismo ocurre con las partículas de materia. Los electrones, quarks y todas las demás especies de partículas también surgen de las vibraciones de cuerdas abiertas con puntos finales atrapados.*Por lo tanto, en el escenario del mundo de las branas, tú y yo y todo lo que hemos visto está permanentemente aprisionado dentro de nuestra triple corona.* Teniendo en cuenta el tiempo, todo está atrapado dentro de nuestra rebanada cuatridimensional del espacio tiempo.

Bueno, casi todo. Para la fuerza de gravedad, la situación es diferente. Los análisis matemáticos del escenario del mundo de las marcas han demostrado que los gravitones surgen del patrón vibratorio de las cuerdas cerradas, de forma muy similar a los escenarios sin marcas previamente discutidos. Y las cuerdas cerradas, cuerdas sin puntos finales, no son atrapadas por las branas. Son tan libres de dejar una brana como de vagar por ella o a través de ella. Así que, si viviéramos en una brana, no estaríamos completamente aislados de las dimensiones adicionales. A través de la fuerza gravitatoria, podríamos influenciar y ser influenciados por las dimensiones adicionales. La gravedad, en tal escenario, proporcionaría nuestro único medio para interactuar más allá de nuestras tres dimensiones espaciales.

¿Qué tan grandes podrían ser las dimensiones adicionales antes de que nos diéramos cuenta de ellas a través de la fuerza gravitacional? Esta es una pregunta interesante y crítica, así que echemos un vistazo.

La gravedad y las grandes dimensiones adicionales

En 1687, cuando Newton propuso su ley universal de la gravedad, estaba haciendo una fuerte declaración sobre el número de dimensiones del espacio. Newton no sólo dijo que la fuerza de atracción entre dos objetos se debilita a medida que la distancia entre ellos aumenta. Propuso una fórmula, la ley del cuadrado inverso, que describe precisamente cómo la atracción gravitatoria disminuirá a medida que dos objetos se separen. Según esta fórmula, si duplica la distancia entre los objetos, su atracción gravitatoria caerá en un factor de 4 (2^2); si triplica la distancia, caerá en un factor de 9 (3^2); si cuadriplica la distancia, caerá en un factor de 16 (4^2); y más generalmente, la fuerza gravitatoria cae en proporción al cuadrado de la separación. Como se ha hecho abundantemente evidente en los últimos cientos de años, esta fórmula funciona.

¿Pero *por qué* la fuerza depende del cuadrado de la distancia? ¿Por qué la fuerza no cae como el cubo de la separación (de modo que si duplica la distancia, la fuerza disminuye en un factor de 8) o la cuarta potencia (de modo que si duplica la distancia, la fuerza disminuye en un factor de 16), o quizás, aún más simple, por qué la fuerza gravitacional entre dos objetos no cae en proporción directa a la separación (de modo que si duplica la distancia, la fuerza disminuye en un factor de 2)? La respuesta está ligada directamente al número de dimensiones del espacio.

Una forma de verlo es pensar en cómo el número de gravitones emitidos y absorbidos por los dos objetos depende de su separación, o pensar en cómo la curvatura del espacio tiempo que experimenta cada objeto disminuye a medida que aumenta la distancia entre ellos. Pero tomemos un enfoque más simple y anticuado, que nos lleve rápida e intuitivamente a la respuesta correcta. Dibujemos una figura (Figura 13.4a) que ilustra esquemáticamente el campo gravitatorio producido por un objeto masivo - digamos el sol - como la Figura 3.1 ilustra esquemáticamente el campo magnético producido por una barra de imán. Mientras que las líneas de campo magnético se desplazan desde el polo norte del imán hasta su polo sur, observe que las líneas de campo gravitatorio emanan radialmente hacia fuera en todas las direcciones y siguen su curso. La fuerza de la atracción gravitatoria que otro objeto, imagínese que es un satélite en órbita, sentiría a una distancia dada es proporcional a la densidad de las líneas de campo en ese lugar. Cuantas más líneas de campo penetren en el satélite, como en la figura 13.4b, mayor será la atracción gravitatoria a la que esté sujeto.

Ahora podemos explicar el origen de la ley del cuadrado inverso de Newton. Una esfera imaginaria centrada en el sol y que atraviesa la ubicación del satélite, como en la figura 13.4c, tiene una superficie que -como la superficie de cualquier esfera en el espacio tridimensional- es proporcional al *cuadrado* de su radio, que en este caso es el *cuadrado de* la distancia entre el sol y el satélite. Esto significa que la densidad de las líneas de campo que pasan por la esfera -el número total de

líneas de campo dividido por el área de la esfera- disminuye a medida que el cuadrado de la separación entre el sol y el satélite. Si se duplica la distancia, el mismo número de líneas de campo están ahora uniformemente repartidas en una esfera con cuatro veces la superficie, y por lo tanto la atracción gravitatoria a esa distancia disminuirá en un factor de cuatro. La ley del cuadrado inverso de Newton para la gravedad es, por lo tanto, un reflejo de una propiedad geométrica de las esferas en tres dimensiones espaciales.

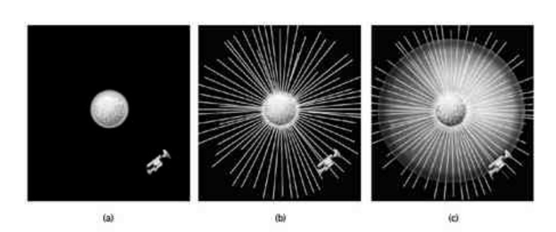


Figura 13.4 La fuerza gravitatoria ejercida por el sol sobre un objeto, como un satélite, es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellos. La razón es que las líneas del campo gravitatorio del sol se extienden uniformemente como en **(** b **)** y, por lo tanto, tienen una densidad a una distancia *d* que es inversamente proporcional al área de una esfera imaginaria de radio *d - esquemáticamente dibujada* en **(** c **) -** un área que, según la geometría básica, es proporcional a d^2.

Por el contrario, si el universo tuviera dos o incluso sólo una dimensión espacial, ¿cómo cambiaría la fórmula de Newton? Bueno, la figura 13.5a muestra una versión bidimensional del sol y su satélite en órbita. Como puedes ver, a cualquier distancia dada las líneas del campo gravitatorio del sol se extienden uniformemente en un círculo, el análogo de una esfera en una dimensión inferior. Dado que la circunferencia del círculo es proporcional a su radio (no al cuadrado de su radio), si duplicamos la separación entre el sol y el satélite, la densidad de las líneas de campo disminuirá en un factor de 2 (no 4) y así la fuerza de la atracción gravitatoria del sol caerá sólo en un factor de 2 (no 4). Si el universo tuviera sólo dos dimensiones espaciales, entonces, la atracción gravitatoria sería inversamente proporcional a la separación, no al cuadrado de la separación.

Si el universo tuviera una sola dimensión espacial, como en la figura 13.5b, la ley de la gravedad sería aún más simple. Las líneas del campo gravitatorio no tendrían espacio para extenderse, por lo que la fuerza de gravedad no disminuiría con la separación. Si se duplicara la distancia entre el sol y el

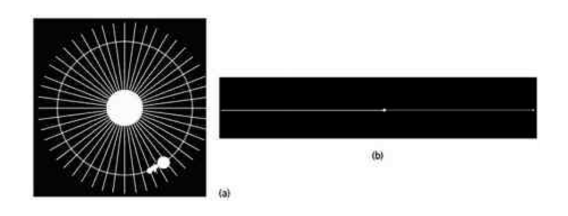


Figura 13.5 En un universo de sólo dos dimensiones espaciales, la fuerza gravitatoria disminuye en proporción a la separación, porque las líneas del campo gravitatorio se extienden uniformemente en un círculo cuya circunferencia es proporcional a su radio. una dimensión espacial, las líneas del campo gravitatorio no tienen espacio para propagarse, por lo que la fuerza gravitatoria es constante, independientemente de la separación.

satélite (suponiendo que en tal universo pudieran existir versiones de tales objetos), el mismo número de líneas de campo penetrarían en el satélite y, por lo tanto, la fuerza de gravedad que actúa entre ellas no cambiaría en absoluto.

Aunque es imposible de dibujar, el patrón ilustrado por las figuras 13.4 y 13.5 se extiende directamente a un universo con cuatro o cinco o seis o cualquier número de dimensiones espaciales. Cuantas más dimensiones espaciales haya, más líneas de fuerza gravitacional del espacio tienen que extenderse. Y cuanto más se extienden, más precipitadamente cae la fuerza de la gravedad con el aumento de la separación. En cuatro dimensiones espaciales, la ley de Newton sería una ley de cubo inverso (el doble de la separación, la fuerza cae en un factor de 8); en cinco dimensiones espaciales, sería una ley de cuarta potencia inversa (el doble de la separación, la fuerza cae en un factor de 16); en seis dimensiones espaciales, sería una ley de quinta potencia inversa (el doble de la separación, la fuerza cae en un factor de 32); y así sucesivamente para los universos de dimensiones cada vez más altas.

Se podría pensar que el éxito de la versión cuadrada inversa de la ley de Newton para explicar una gran cantidad de datos, desde el movimiento de los planetas hasta las trayectorias de los cometas, confirma que vivimos en un universo con precisamente tres dimensiones espaciales. Pero esa conclusión sería precipitada. Sabemos que la ley del cuadrado inverso funciona a escalas astronómicas, [6] y sabemos que funciona a escalas terrestres, y eso concuerda bien con el hecho de que a tales escalas vemos tres dimensiones espaciales. ¿Pero sabemos que funciona a escalas más pequeñas? ¿Hasta qué punto en el microcosmos se ha probado la ley del cuadrado inverso de la gravedad? Resulta que los experimentadores lo han confirmado hasta sólo una décima de milímetro; si dos objetos son llevados a una separación de una décima de milímetro, los datos verifican que la fuerza de su atracción gravitatoria sigue las predicciones de la ley del cuadrado inverso. Pero hasta ahora, ha demostrado ser un importante desafío técnico probar la ley del cuadrado inverso a escalas más cortas (los efectos

cuánticos y la debilidad de la gravedad complican los experimentos). Este es un tema crítico, porque las desviaciones de la ley del cuadrado inverso serían una señal convincente de dimensiones adicionales.

Para ver esto explícitamente, trabajemos con un ejemplo de juguete de dimensiones inferiores que podamos dibujar y analizar fácilmente. Imaginemos que vivimos en un universo con una dimensión espacial, o eso pensábamos, porque sólo una dimensión espacial era visible y, además, siglos de experimentos habían demostrado que la fuerza de gravedad no varía con la separación entre los objetos. Pero también imaginemos que en todos esos años los experimentadores sólo habían sido capaces de probar la ley de la gravedad hasta distancias de alrededor de una décima de milímetro. Para distancias más cortas que eso, nadie tenía datos. Ahora, imaginemos además que, sin que nadie lo supiera excepto un puñado de físicos teóricos marginales, el universo tenía una segunda dimensión espacial enroscada que tenía la forma de la superficie de la cuerda floja de Philippe Petit, como en la figura 12.5. ¿Cómo afectaría esto a futuras pruebas gravitatorias más refinadas? Podemos deducir la respuesta mirando la figura 13.6. A medida que dos objetos diminutos se acercan lo suficiente -mucho más cerca que la circunferencia de la dimensión acurrucada- el carácter bidimensional del espacio se haría evidente de inmediato, porque en esas escalas las líneas del campo gravitatorio *tendrían* espacio para extenderse (Figura 13.6a). En lugar de ser independiente de la distancia, la fuerza de gravedad variaría *inversamente* con la separación cuando los objetos estuvieran lo suficientemente cerca entre sí.



Figura 13.6 Cuando los objetos están cerca, la atracción gravitatoria varía como lo hace en dos dimensiones espaciales. más alejados, la atracción gravitatoria se comporta como en una dimensión espacial: es constante.

Por lo tanto, si usted fuera un experimentador en este universo, y desarrollara métodos exquisitamente precisos para medir la atracción gravitacional, esto es lo que encontraría. Cuando dos objetos estuvieran extremadamente cerca, mucho más cerca que el tamaño de la dimensión acurrucada, su atracción gravitatoria disminuiría en proporción a su separación, tal como esperas para un universo con dos dimensiones espaciales. Pero entonces, cuando los objetos estuvieran tan separados como la circunferencia de la dimensión enroscada, las cosas cambiarían. Más allá de esta distancia, las líneas del campo gravitatorio no podrían extenderse más. Se habrían extendido tanto como hubieran podido en la segunda dimensión enroscada, habrían saturado esa dimensión y, por lo tanto, a partir de esta distancia, la fuerza gravitatoria ya no disminuiría, como se ilustra en

la figura 13.6b. Puedes comparar esta saturación con las tuberías de una casa antigua. Si alguien abre el grifo del fregadero de la cocina cuando está a punto de enjuagarse el champú de su cabello, la presión del agua puede disminuir porque el agua se esparce entre las dos salidas. La presión disminuirá una vez más si alguien abre el grifo de la lavandería, ya que el agua se esparcirá aún más. Pero una vez que todos los grifos de la casa estén abiertos, la presión se mantendrá constante. Aunque puede que no proporcione la relajante experiencia de alta presión de agua que habías anticipado, la presión en la ducha no bajará más una vez que el agua se haya esparcido completamente por todas las salidas "extras". Del mismo modo, una vez que el campo gravitatorio se haya extendido completamente a través de la dimensión extra enroscada, no disminuirá con una mayor separación.

De sus datos se deducirán dos cosas. Primero, del hecho de que la fuerza gravitatoria disminuyó en proporción a la distancia cuando los objetos están muy cerca, te darías cuenta de que el universo tiene *dos* dimensiones espaciales, no una. Segundo, del cruce a una fuerza gravitatoria que es constante, el resultado conocido por cientos de años de experimentos previos, concluirías que una de estas dimensiones está enroscada, con un tamaño aproximadamente igual a la distancia a la que tiene lugar el cruce. Y con este resultado, se anularían siglos, si no milenios, de creencia en algo tan básico, el número de dimensiones espaciales, que parecía casi incuestionable.

Aunque he ambientado esta historia en un universo de dimensiones inferiores, para facilitar la vista, nuestra situación podría ser muy parecida. Cientos de años de experimentos han confirmado que la gravedad varía inversamente al cuadrado de la distancia, dando una fuerte evidencia de que hay tres dimensiones espaciales. Pero hasta 1998, ningún experimento había probado la fuerza de la gravedad en separaciones menores de un milímetro (hoy, como se ha mencionado, esto ha sido empujado a una décima de milímetro). Esto llevó a Savas Dimopoulos, de Stanford, Nima Arkani-Hamed, ahora de Harvard, y Gia Dvali, de la Universidad de Nueva York, a proponer que *en el escenario de braneworld las dimensiones adicionales podrían ser tan grandes como un milímetro y aún así no se habrían detectado.* Esta sugerencia radical inspiró a varios grupos experimentales a iniciar un estudio de la gravedad a distancias submilimétricas con la esperanza de encontrar violaciones de la ley del cuadrado inverso; hasta ahora no se ha encontrado ninguna, hasta una décima de milímetro. Por lo tanto, incluso con los experimentos de gravedad de última generación de hoy en día, *si estamos viviendo dentro de una triple bruna, las dimensiones adicionales podrían ser tan grandes como una décima de milímetro, y sin embargo no lo sabríamos.*

Esta es una de las realizaciones más sorprendentes de la última década. Usando las tres fuerzas no gravitacionales, podemos investigar hasta una milmillonésima de una milmillonésima ($^{10-18}$) de metro, y nadie ha encontrado ninguna evidencia de

dimensiones adicionales. Pero en el escenario del mundo de la brana, las fuerzas no gravitacionales son impotentes en la búsqueda de dimensiones adicionales ya que están atrapadas en la propia brana. Sólo la gravedad puede darnos una idea de la naturaleza de las dimensiones adicionales, y, a día de hoy, las dimensiones adicionales podrían ser tan gruesas como un cabello humano y, sin embargo, serían completamente invisibles para nuestros instrumentos más sofisticados. Ahora mismo, justo a tu lado, justo a mi lado, y justo al lado de todos los demás, podría haber otra dimensión espacial, una dimensión más allá de izquierda/derecha, atrás/adelante, y arriba/abajo, una dimensión que está acurrucada pero que aún así es lo suficientemente grande como para tragarse algo tan grueso como esta página, que permanece más allá de nuestro alcance.[38]

Grandes dimensiones extras y grandes cuerdas

Al atrapar tres de las cuatro fuerzas, el escenario del "braneworld" relaja significativamente las restricciones experimentales sobre cuán grandes pueden ser las dimensiones adicionales, pero las dimensiones adicionales no son lo único que este enfoque permite para hacerse más grande. Basándose en las ideas de Witten, Joe Lykken, Constantin Bachas y otros, Ignatios Antoniadis, junto con Arkani-Hamed, Dimopoulos y Dvali, se dieron cuenta de que en el escenario del mundo de salvamento, incluso las cuerdas de baja energía no excitadas pueden ser *mucho* más grandes de lo que se pensaba. De hecho, las dos escalas - el tamaño de las dimensiones adicionales y el tamaño de las cuerdas - están estrechamente relacionadas.

Recuerde del capítulo anterior que el tamaño básico de la cuerda se determina requiriendo que su patrón vibratorio de gravitones comunique una fuerza gravitatoria de la fuerza observada. La debilidad de la gravedad se traduce en que la cuerda es muy corta, más o menos de la longitud de Planck ($10^{-33 \text{ centímetros}}$). Pero esta conclusión depende en gran medida del tamaño de las dimensiones adicionales. La razón es que en la teoría de cuerdas/M, la fuerza de la fuerza gravitatoria que observamos en nuestras tres dimensiones extendidas representa una interacción entre dos factores. Un factor es la fuerza intrínseca y fundamental de la fuerza gravitatoria. El segundo factor es el tamaño de las dimensiones extendidas. Cuanto más grandes sean las dimensiones adicionales, más gravedad puede derramarse en ellas y más débil *será* su fuerza en las dimensiones conocidas. Así como las tuberías más grandes producen una presión de agua más débil porque permiten que el agua se extienda, las dimensiones adicionales más grandes producen una gravedad más débil, porque dan a la gravedad más espacio para extenderse.

Los cálculos originales que determinaron la longitud de la cuerda asumieron que las dimensiones adicionales eran tan pequeñas, del orden de la longitud de

Planck, que la gravedad no podía derramarse en ellas en absoluto. Bajo esta suposición, la gravedad parece débil porque *es débil*. Pero ahora, si trabajamos en el escenario del mundo de las cuerdas y permitimos que las dimensiones adicionales sean mucho más grandes de lo que se había considerado anteriormente, la debilidad observada de la gravedad ya no significa que sea intrínsecamente débil. En su lugar, la gravedad podría ser una fuerza relativamente poderosa que parece débil sólo porque las dimensiones adicionales relativamente grandes, como los grandes tubos, diluyen su fuerza intrínseca. Siguiendo esta línea de razonamiento, si la gravedad es mucho más fuerte de lo que una vez se pensó, las cuerdas pueden ser mucho más largas de lo que una vez se pensó.

A partir de hoy, la pregunta de cuánto tiempo exactamente no tiene una respuesta única y definitiva. Con la recién descubierta libertad de variar tanto el tamaño de las cuerdas como el tamaño de las dimensiones adicionales en un rango mucho más amplio que el previamente previsto, hay un número de posibilidades. Dimopoulos y sus colaboradores han argumentado que los resultados experimentales existentes, tanto de la física de partículas como de la astrofísica, muestran que las cuerdas no excitadas no pueden ser más grandes que una milmillonésima de una milmillonésima de metro (10^{-18} metros). Mientras que son pequeñas según los estándares cotidianos, son cerca de cien millones de billones (10^{17}) de veces más grandes que la longitud de Planck, casi cien millones de billones de *veces más grandes de lo que se pensaba anteriormente.* Como veremos ahora, sería lo suficientemente grande como para que las señales de las cuerdas pudieran ser detectadas por la próxima generación de aceleradores de partículas.

¿La teoría de las cuerdas se enfrenta al experimento?

La posibilidad de que estemos viviendo dentro de una gran triangulación es, por supuesto, sólo eso: una posibilidad. Y, dentro del escenario de la brana, la posibilidad de que las dimensiones adicionales puedan ser mucho más grandes de lo que una vez se pensó, y la posibilidad relacionada de que las cuerdas también puedan ser mucho más grandes de lo que una vez se pensó, son también sólo eso: posibilidades. *Pero son posibilidades tremendamente excitantes.* Cierto, incluso si el escenario del mundo de las marcas es correcto, las dimensiones adicionales y el tamaño de las cuerdas podrían ser planckianas. Pero la posibilidad dentro de la teoría de cuerdas/M de que las cuerdas y las dimensiones adicionales sean mucho más grandes, para estar justo fuera del alcance de la tecnología actual, es fantástica. Significa que hay al menos una posibilidad de que en los próximos años, la teoría de cuerdas/M entre en contacto con la física observable y se convierta en una ciencia experimental.

¿Qué tan grande es la posibilidad? No lo sé, y tampoco lo sabe nadie más. Mi intuición me dice que es improbable, pero mi intuición está informada por una década y media de trabajo en el marco convencional de cuerdas de tamaño Planck y dimensiones extra de tamaño Planck. Quizás mis instintos son anticuados. Afortunadamente, la cuestión se resolverá sin la más mínima preocupación por la intuición de nadie. Si las cuerdas son grandes, o si algunas de las dimensiones adicionales son grandes, las implicaciones para los próximos experimentos son espectaculares.

En el próximo capítulo, consideraremos una variedad de experimentos que probarán, entre otras cosas, las posibilidades de cuerdas comparativamente grandes y grandes dimensiones adicionales, por lo que aquí sólo abriré el apetito. Si las cuerdas son tan grandes como una milmillonésima de una milmillonésima (10^{-18}) de metro, las partículas correspondientes a las vibraciones armónicas más altas de la figura 12.4 no tendrán masas enormes, superiores a la masa de Planck, como en el escenario estándar. En su lugar, sus masas serán sólo de mil a unos pocos miles de veces la de un protón, y eso es lo suficientemente bajo como para estar al alcance del Gran Colisionador de Hadrones que se está construyendo en el CERN. Si estas vibraciones de la cuerda se excitaran a través de colisiones de alta energía, los detectores del acelerador se encenderían como la bola de cristal de Times Square en la víspera de Año Nuevo. Se produciría una gran cantidad de partículas nunca antes vistas, y sus masas estarían relacionadas entre sí de la misma manera que las diversas armónicas están relacionadas en un violonchelo. La firma de la teoría de las cuerdas se grabaría en los datos con una floritura que habría impresionado a John Hancock. Los investigadores no podrían perderse esto, incluso sin sus gafas.

Además, en el escenario del braneworld, las colisiones de alta energía podrían incluso producir... obtener estos mini-agujeros negros. Aunque normalmente pensamos en los agujeros negros como estructuras gigantescas en el espacio profundo, se sabe desde los primeros días de la relatividad general que si atiborraras suficiente materia en la palma de tu mano, crearías un pequeño agujero negro. Esto no ocurre porque nadie tiene la fuerza de agarre, y ningún dispositivo mecánico, es ni remotamente lo suficientemente fuerte como para ejercer una fuerza de compresión suficiente. En su lugar, el único mecanismo aceptado para la producción de agujeros negros implica la atracción gravitatoria de una estrella enormemente masiva, superando la presión exterior normalmente ejercida por los procesos de fusión nuclear de la estrella, causando que la estrella se colapse sobre sí misma. Pero si la fuerza intrínseca de la gravedad a pequeña escala es mucho mayor de lo que se pensaba anteriormente, podrían producirse pequeños agujeros negros con una fuerza de compresión significativamente menor de lo que se creía anteriormente. Los cálculos muestran que el Gran Colisionador de Hadrones puede tener el poder de compresión suficiente para crear una cornucopia de agujeros negros microscópicos a través de colisiones de alta energía entre protones. [7] Piensa en lo increíble que sería eso. El Gran

Colisionador de Hadrones podría convertirse en una fábrica para producir agujeros negros microscópicos! Estos agujeros negros serían tan pequeños y durarían tan poco tiempo que no nos supondrían la más mínima amenaza (hace años, Stephen Hawking demostró que todos los agujeros negros se desintegran a través de procesos cuánticos - los grandes muy lentamente, los pequeños muy rápidamente), pero su producción confirmaría algunas de las ideas más exóticas jamás contempladas.

Cosmología Braneworld

Uno de los objetivos principales de la investigación actual, que está siendo perseguido con ahínco por los científicos de todo el mundo (incluido yo), es formular una comprensión de la cosmología que incorpore los nuevos conocimientos de la teoría de las cuerdas/M. La razón es clara: la cosmología no sólo se enfrenta a las grandes cuestiones que se plantean, y no sólo nos hemos dado cuenta de que algunos aspectos de la experiencia familiar, como la flecha del tiempo, están vinculados a las condiciones del nacimiento del universo, sino que la cosmología también proporciona a un teórico lo que Nueva York proporcionó a Sinatra: un terreno de pruebas por excelencia. Si una teoría puede hacerlo en las condiciones extremas características de los primeros momentos del universo, puede hacerlo en cualquier lugar.

Hoy en día, la cosmología según la teoría de la cuerda/M es un trabajo en progreso, con los investigadores dirigiéndose por dos caminos principales. El primero y más convencional imagina que así como la inflación proporcionó un breve pero profundo frente a la teoría del big bang estándar, la Teoría de Cuerdas/M proporciona un frente aún más temprano y quizás aún más profundo a la inflación. La visión es que la teoría de la cuerda/M-teoría desentrañará la mancha borrosa que hemos utilizado para denotar nuestra ignorancia de los primeros momentos del universo, y después de eso, el drama cosmológico se desarrollará de acuerdo con el guión notablemente exitoso de la teoría de la inflación, relatado en capítulos anteriores.

Si bien se ha progresado en los detalles específicos que requiere esta visión (como tratar de comprender por qué sólo tres de las dimensiones espaciales del universo sufrieron una expansión, así como desarrollar métodos matemáticos que pueden resultar relevantes para analizar el reino sin espacio/tiempo que puede preceder a la inflación), los momentos eureka aún no se han producido. La intuición es que mientras que la cosmología inflacionaria imagina que el universo observable se hace cada vez más pequeño en tiempos cada vez más tempranos - y por lo tanto es cada vez más caliente, más denso y más energético- la teoría de la cuerda/M domina este comportamiento indisciplinado (en términos físicos, "singular") introduciendo un tamaño mínimo (como en nuestra discusión de las

páginas 350-351) por debajo del cual nuevas y menos singulares cantidades físicas se vuelven relevantes. Este razonamiento se encuentra en el corazón de la exitosa fusión de la relatividad general y la mecánica cuántica de la Teoría de Cuerdas/M, y muchos investigadores esperan que en breve determinemos cómo aplicar el mismo razonamiento en el contexto de la cosmología. Pero, por ahora, el parche borroso sigue pareciendo borroso, y nadie sabe cuándo se logrará la claridad.

El segundo enfoque emplea el escenario de un mundo nuevo, y en su encarnación más radical plantea un marco cosmológico completamente nuevo. No está nada claro si este enfoque sobrevivirá al escrutinio matemático detallado, pero proporciona un buen ejemplo de cómo los avances en la teoría fundamental pueden sugerir nuevos caminos a través de un territorio bien conocido. La propuesta se denomina *modelo cíclico.*

Cosmología Cíclica

Desde el punto de vista del tiempo, la experiencia ordinaria nos enfrenta a dos tipos de fenómenos: los que tienen un principio, un medio y un final claramente delineados (este libro, un partido de béisbol, una vida humana) y los que son cíclicos, sucediendo una y otra vez (el cambio de estaciones, la salida y la puesta del sol, las bodas de Larry King). Por supuesto, al examinar más de cerca aprendemos que los fenómenos cíclicos también tienen un principio y un final, ya que los ciclos generalmente no se prolongan para siempre. El sol ha estado saliendo y poniéndose, es decir, la Tierra ha estado girando sobre su eje mientras giraba alrededor del sol, cada día durante unos 5.000 millones de años. Pero antes de eso, el sol y el sistema solar aún no se habían formado. Y un día, dentro de unos 5.000 millones de años, el sol se convertirá en una estrella gigante roja, engullendo los planetas interiores, incluida la Tierra, y ya no habrá ni siquiera la noción de un sol naciente y poniente, al menos no aquí.

Pero estos son reconocimientos científicos modernos. Para los antiguos, los fenómenos cíclicos parecían eternamente cíclicos. Y para muchos, los fenómenos cíclicos, que seguían su curso y volvían continuamente para empezar de nuevo, eran los fenómenos primarios. Los ciclos de los días y las estaciones marcan el ritmo del trabajo y la vida, así que no es de extrañar que algunas de las más antiguas cosmologías registradas vislumbraran el desarrollo del mundo como un proceso cíclico. En lugar de plantear un principio, un medio y un fin, una cosmología cíclica imagina que el mundo cambia a través del tiempo de la misma manera que la luna cambia por fases: después de haber pasado por una secuencia completa, las condiciones están maduras para que todo comience de nuevo e inicie otro ciclo.

Desde el descubrimiento de la relatividad general, se han propuesto varios modelos cosmológicos cíclicos; el más conocido fue desarrollado en la década de 1930 por Richard Tolman del Instituto de Tecnología de California. Tolman sugirió que la expansión observada del universo podría ralentizarse, detenerse algún día y ser seguida por un período de contracción en el que el universo se hiciera cada vez más pequeño. Pero en lugar de llegar a un final ardiente en el que implosione sobre sí mismo y llegue a su fin, el universo podría, según Tolman, experimentar un rebote*:* el espacio podría encogerse hasta cierto tamaño pequeño y luego rebotar, iniciando un nuevo ciclo de expansión seguido una vez más por la contracción. Un universo que repitiera eternamente este ciclo -expansión, contracción, rebote, expansión de nuevo- evitaría elegantemente las espinosas cuestiones del origen: en tal escenario, el concepto mismo de origen sería inaplicable ya que el universo siempre lo fue y siempre lo será.

Pero Tolman se dio cuenta de que mirando hacia atrás en el tiempo a partir de hoy, los ciclos podrían haberse repetido durante un tiempo, pero no indefinidamente. La razón es que durante cada ciclo, la segunda ley de la termodinámica dicta que la entropía, en promedio, se elevaría. [8] Y de acuerdo con la relatividad general, la cantidad de entropía al comienzo de cada nuevo ciclo determina cuánto tiempo durará ese ciclo. Más entropía significa un período más largo de expansión antes de que el movimiento hacia afuera se detenga y el movimiento hacia adentro tome el control. Por lo tanto, cada ciclo sucesivo duraría mucho más tiempo que su predecesor; de manera equivalente, los ciclos anteriores serían cada vez más cortos. Cuando se analiza matemáticamente, el constante acortamiento de los ciclos implica que no pueden extenderse infinitamente hacia el pasado. Incluso en el marco cíclico de Tolman, el universo tendría un comienzo.

La propuesta de Tolman invocaba un universo esférico que, como hemos visto, ha sido descartado por las observaciones. Pero una encarnación radicalmente nueva de la cosmología cíclica, que implica un universo plano, se ha desarrollado recientemente dentro de la teoría de las cuerdas. La idea proviene de Paul Steinhardt y su colaborador Neil Turok de la Universidad de Cambridge (con un uso intensivo de los resultados descubiertos en sus colaboraciones con Burt Ovrut, Nathan Seiberg y Justin Khoury) y propone un nuevo mecanismo para impulsar la evolución cósmica.[9] En pocas palabras, sugieren que estamos viviendo dentro de una triple corona que colisiona violentamente cada pocos billones de años con otra triple corona cercana y paralela. Y el "bang" de la colisión inicia cada nuevo ciclo cosmológico.

La configuración básica de la propuesta se ilustra en la figura 13.7 y fue sugerida hace algunos años por Ho ava y Witten en un contexto no cosmológico. Ho ava y Witten intentaban completar la unidad propuesta por Witten entre las cinco teorías de cuerdas y descubrieron que si una de las siete dimensiones adicionales de la teoría M tenía una forma muy simple -no un círculo, como en la figura 12.7, sino

un pequeño segmento de una línea recta, como en la figura 13.7- y estaba delimitada por las denominadas branas del fin del mundo unidas como sujetalibros, entonces se podría establecer una conexión directa entre la teoría de cuerdas de la E Heterótica y todas las demás. Los detalles de cómo establecieron esta conexión no son obvios ni de la esencia (si usted está interesado, vea, por ejemplo, *El Universo Elegante, Capítulo* 12); lo que importa aquí es que es un punto de partida que surge naturalmente de la propia teoría. Steinhardt y Turok la reclutaron para su propuesta cosmológica.

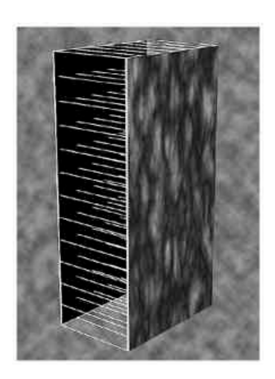


Figura 13.7 Dos tresbranas, separadas por un corto intervalo.

Específicamente, Steinhardt y Turok imaginan que cada brana de la figura 13.7 tiene tres dimensiones espaciales, con el segmento de línea entre ellas proporcionando una cuarta dimensión espacial. Las seis dimensiones espaciales restantes están enroscadas en un espacio Calabi-Yau (que no se muestra en la figura) que tiene la forma adecuada para que los patrones de vibración de las cuerdas den cuenta de las especies de partículas conocidas. [10] El universo del que somos directamente conscientes corresponde a una de estas tres ramas; si se quiere, se puede pensar en la segunda rama como otro universo, cuyos habitantes, si los hubiera, también serían conscientes de sólo tres dimensiones espaciales, suponiendo que su tecnología y experiencia experimental no excediera en gran medida la nuestra. En esta configuración, entonces, otro universo de tres ramas, otro universo, está justo al lado. No se encuentra a más de una fracción de milímetro de distancia (la separación está en la cuarta dimensión espacial, como en la figura 13.7), pero debido a que nuestra triple rama es tan pegajosa y la gravedad que experimentamos es tan débil, no tenemos ninguna evidencia directa de su existencia, ni sus hipotéticos habitantes ninguna evidencia de la nuestra.

Pero, según el modelo cosmológico cíclico de Steinhardt y Turok, la figura 13.7 no es como siempre ha sido o como siempre será. En cambio, en su enfoque, las dos tres ramas se atraen entre sí -casi como si estuvieran conectadas por pequeñas bandas elásticas- y esto implica que cada una impulsa la evolución cosmológica de la otra: las ramas participan en un ciclo interminable de colisión, rebote y colisión una vez más, regenerando eternamente sus mundos tridimensionales en

expansión. Para ver cómo va esto, mira la figura 13.8, que ilustra un ciclo completo, paso a paso.

En la Etapa 1, las dos tres bridas se han precipitado una hacia la otra y se han unido, y ahora están rebotando. La tremenda energía de la colisión deposita una cantidad significativa de radiación y materia de alta temperatura en cada una de las tres bridas que rebotan, y esto es clave-Steinhardt y Turok argumentan que *las propiedades detalladas de esta materia y radiación tienen un perfil casi idéntico a lo que se produce en el modelo inflacionario.* Aunque todavía hay cierta controversia sobre este punto, Steinhardt y Turok afirman por lo tanto que la colisión entre las dos tres ramas da como resultado condiciones físicas muy cercanas a lo que serían un momento después del estallido de la expansión inflacionaria en el enfoque más convencional discutido en el Capítulo 10. No es sorprendente, entonces, para un observador hipotético dentro de nuestra triple corona, que las próximas etapas del modelo cosmológico cíclico sean esencialmente las mismas que las del enfoque estándar, como se ilustra en la figura 9.2 (donde esa figura se interpreta ahora como la representación de la evolución en una de las tres ramas). A saber, a medida que nuestra triple bruna rebota en la colisión, se expande y se enfría, y las estructuras cósmicas como las estrellas y las galaxias se fusionan gradualmente a partir del plasma primordial, como se puede ver en la Etapa 2. Luego, inspirados por las recientes observaciones de supernovas discutidas en el Capítulo 10, Steinhardt y Turok configuran su modelo de manera que alrededor de 7 mil millones de años en el ciclo - Etapa 3 - la energía en la materia ordinaria y la radiación se diluye suficientemente por la expansión de la brana de manera que un componente de energía oscura se impone y, a través de su presión negativa, impulsa una era de expansión acelerada. (Esto requiere un ajuste arbitrario de los detalles, pero permite que el modelo coincida con la observación, y por lo tanto, los defensores del modelo cíclico argumentan, está bien motivado). Unos 7.000 millones de años después, los humanos nos encontramos aquí en la Tierra, al menos en el ciclo actual, experimentando las primeras etapas de la fase acelerada. Luego, durante aproximadamente los siguientes *trillones de* años, no ocurre mucho más allá de la continua expansión acelerada de nuestra triple corona. Eso es suficiente para que nuestro espacio tridimensional se haya estirado por un factor tan colosal que la materia y la radiación se diluyan casi por completo, dejando al mundo de la marca con un aspecto casi completamente vacío y completamente uniforme: Etapa 4.

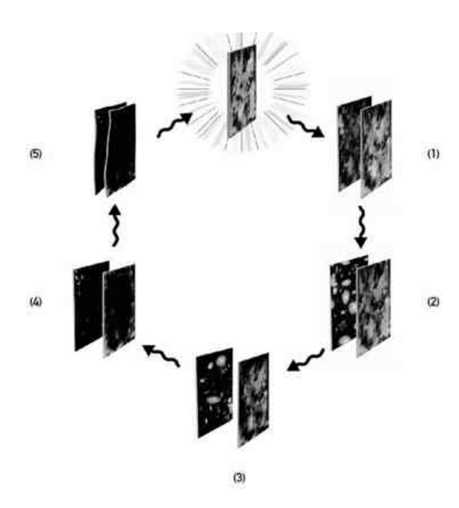


Figura 13.8 Diversas etapas del modelo cosmológico del mundo de las branquias cíclicas.

En este momento, nuestra triple corona ha completado su rebote de la colisión inicial y ha comenzado a acercarse a la segunda triple corona una vez más. A medida que nos acercamos a otra colisión, los nervios cuánticos de las cuerdas unidas a nuestra brana cubren su vacío uniforme con pequeñas ondulaciones, la Etapa 5. A medida que continuamos acelerando, las ondas siguen creciendo; entonces, en una colisión cataclísmica, chocamos con la segunda triple corona, rebotamos y el ciclo comienza de nuevo. Las ondas cuánticas imprimen pequeñas inhomogeneidades en la radiación y en la materia producidas durante la colisión y, al igual que en el escenario inflacionario, estas desviaciones de la uniformidad perfecta crecen en grupos que finalmente generan estrellas y galaxias.

Estas son las principales etapas del modelo cíclico (también conocido tiernamente como el "*big splat*"). Su premisa -colliding braneworlds- es muy diferente a la de la exitosa teoría inflacionaria, pero hay, sin embargo, importantes puntos de contacto entre los dos enfoques. Que ambos se basan en la agitación cuántica para generar no uniformidades iniciales es una similitud esencial. De hecho, Steinhardt y Turok sostienen que las ecuaciones que rigen las ondulaciones cuánticas en el modelo cíclico son casi idénticas a las del cuadro inflacionario, por lo que las no uniformidades resultantes predichas por las dos teorías son también casi idénticas. [11] Además, aunque no hay un estallido inflacionario en el modelo cíclico, hay un período de un billón de años (que comienza en la Etapa 3) de expansión acelerada más leve. Pero en realidad es sólo una cuestión de prisa versus paciencia; lo que el modelo inflacionario logra en un instante, el modelo cíclico lo logra en una eternidad comparativa. Puesto que la colisión en el modelo cíclico no es el comienzo del universo, existe el lujo de resolver lentamente las cuestiones cosmológicas (como los problemas de la planicie y el horizonte) durante los últimos trillones de años de cada ciclo *anterior*. Eones de suave pero constante expansión acelerada al final de cada ciclo estiran nuestra triple bruna de forma

agradable y plana, y, excepto por pequeñas pero importantes fluctuaciones cuánticas, la hacen completamente uniforme. Y así, la larga etapa final de cada ciclo, seguida por el splat al comienzo del siguiente ciclo, produce un ambiente muy cercano al producido por la corta oleada de expansión en el enfoque inflacionario.

Una breve evaluación

En sus actuales niveles de desarrollo, tanto el modelo inflacionario como el cíclico proporcionan marcos cosmológicos perspicaces, pero ninguno de ellos ofrece una teoría completa. El desconocimiento de las condiciones imperantes durante los primeros momentos del universo obliga a los defensores de la cosmología inflacionaria a suponer simplemente, sin justificación teórica, que se dieron las condiciones necesarias para iniciar la inflación. Si lo hicieron, la teoría resuelve numerosos enigmas cosmológicos y lanza la flecha del tiempo. Pero tales éxitos dependen de que la inflación se produzca en primer lugar. Lo que es más, la cosmología inflacionaria no se ha integrado perfectamente en la teoría de cuerdas y por lo tanto no es todavía parte de una fusión consistente de la mecánica cuántica y la relatividad general.

El modelo cíclico tiene su propia cuota de deficiencias. Como en el modelo de Tolman, la consideración de la acumulación de entropía (y también de la mecánica cuántica [12]) asegura que los ciclos del modelo cíclico no podrían haber continuado para siempre. En cambio, los ciclos comenzaron en algún momento definido del pasado, y así, como con la inflación, necesitamos una explicación de cómo comenzó el primer ciclo. Si así fue, entonces la teoría, también como la inflación, resuelve los principales problemas cosmológicos y establece la flecha del tiempo que apunta desde cada salpicadura de baja entropía hacia adelante a través de las siguientes etapas de la figura 13.8. Pero, tal y como se concibe actualmente, el modelo cíclico no ofrece ninguna explicación de cómo o por qué el universo se encuentra en la configuración necesaria de la figura 13.8. ¿Por qué, por ejemplo, seis dimensiones se enroscan en una forma particular de Calabi-Yau mientras que una de las dimensiones adicionales toma obedientemente la forma de un segmento espacial que separa dos tres ramas? ¿Cómo es que las dos triples brunas del fin del mundo se alinean tan perfectamente y se atraen entre sí con la fuerza justa para que las etapas de la figura 13.8 procedan como hemos descrito? Y, lo que es de importancia crítica, ¿qué sucede realmente cuando las dos tres bridas chocan en la versión del modelo cíclico de una explosión?

Sobre esta última cuestión, hay esperanza de que el splat del modelo cíclico sea menos problemático que la singularidad encontrada en el tiempo cero en la cosmología inflacionaria. En lugar de que todo el espacio se comprima infinitamente, en el enfoque cíclico sólo se comprime la única dimensión entre las

branas; las propias branas experimentan una expansión general, no una contracción, durante cada ciclo. Y esto, han argumentado Steinhardt, Turok y sus colaboradores, implica una temperatura finita y densidades *finitas* en las propias branas. Pero esta es una conclusión muy tentativa porque, hasta ahora, nadie ha sido capaz de obtener lo mejor de las ecuaciones y averiguar lo que sucedería si las branas se chocan entre sí. De hecho, los análisis realizados hasta ahora apuntan a que la fractura está sujeta al mismo problema que aflige a la teoría inflacionaria en el tiempo cero: las matemáticas se descomponen. Por lo tanto, la cosmología todavía necesita una resolución rigurosa de su estrella singular, ya sea el verdadero comienzo del universo, o el comienzo de nuestro ciclo actual.

La característica más convincente del modelo cíclico es la forma en que incorpora la energía oscura y la expansión acelerada observada. En 1998, cuando se descubrió que el universo está experimentando una expansión acelerada, fue una gran sorpresa para la mayoría de los físicos y astrónomos. Aunque puede incorporarse al cuadro cosmológico inflacionario asumiendo que el universo contiene precisamente la cantidad correcta de energía oscura, la expansión acelerada parece ser un añadido torpe. En el modelo cíclico, por el contrario, el papel de la energía oscura es natural y fundamental. El período de un billón de años de expansión lenta pero constantemente acelerada es crucial para hacer borrón y cuenta nueva, para diluir el universo observable hasta casi la nada y para restablecer las condiciones en preparación para el próximo ciclo. Desde este punto de vista, tanto el modelo inflacionario como el cíclico se basan en la expansión acelerada -el modelo inflacionario cerca de su comienzo y el modelo cíclico al final de cada uno de sus ciclos- pero sólo este último tiene un apoyo observacional directo. (Recuerde, el enfoque cíclico está diseñado de tal manera que apenas estamos entrando en la fase del trillón de años de expansión acelerada, y dicha expansión ha sido observada recientemente). Esto es una marca en la columna del modelo cíclico, pero también significa que si la expansión acelerada no es confirmada por las observaciones futuras, el modelo inflacionario podría sobrevivir (aunque el rompecabezas del 70 por ciento que falta del presupuesto energético del universo surgiría de nuevo) pero el modelo cíclico no podría.

Nuevas visiones del espacio-tiempo

El escenario del braneworld y el modelo cosmológico cíclico que generó son altamente especulativos. Los he discutido aquí no tanto porque esté seguro de que son correctos, sino porque quiero ilustrar las nuevas y sorprendentes formas de pensar sobre el espacio que habitamos y la evolución que ha experimentado, inspiradas en la teoría de las cuerdas. Si estamos viviendo dentro de una triple corona, la pregunta secular sobre la corporeidad del espacio tridimensional tendría su respuesta más definitiva: el espacio sería una corona, y por lo tanto sería

definitivamente un algo. También podría no ser nada particularmente especial, ya que podría haber muchas otras branas, de varias dimensiones, flotando dentro de la expansión dimensional superior de la teoría de las cuerdas. Y si la evolución cosmológica en nuestra triple rama es impulsada por repetidas colisiones con una rama cercana, el tiempo tal como lo conocemos sólo abarcaría uno de los muchos ciclos del universo, con un big bang seguido de otro, y luego otro.

Para mí, es una visión que es a la vez emocionante y humilde. Puede haber mucho más en el espacio y el tiempo de lo que anticipamos; si lo hay, lo que consideramos "todo" puede ser sólo un pequeño componente de una realidad mucho más rica.

V - REALIDAD E IMAGINACIÓN

14 - Arriba en los cielos y abajo en la tierra

EXPERIMENTANDO CON EL ESPACIO Y EL TIEMPO

Hemos recorrido un largo camino desde que Empédocles de Agrigento explicó el universo usando la tierra, el aire, el fuego y el agua. Y gran parte del progreso que hemos hecho, desde Newton hasta los revolucionarios descubrimientos del siglo XX, se ha visto espectacularmente confirmado por la confirmación experimental de predicciones teóricas detalladas y precisas. Pero desde mediados de los 80, hemos sido víctimas de nuestro propio éxito. Con el incesante impulso de empujar los límites del entendimiento cada vez más lejos, nuestras teorías han entrado en reinos más allá del alcance de nuestra tecnología actual.

Sin embargo, con diligencia y suerte, muchas ideas de vanguardia se pondrán a prueba durante las próximas décadas. Como veremos en este capítulo, los experimentos planeados o en curso tienen el potencial de dar mucha información sobre la existencia de dimensiones adicionales, la composición de la materia oscura y la energía oscura, el origen de la masa y el océano de Higgs, aspectos de la cosmología del universo temprano, la relevancia de la supersimetría y, posiblemente, la veracidad de la propia teoría de cuerdas. Y así, con un poco más de suerte, algunas ideas imaginativas e innovadoras sobre la unificación, la naturaleza del espacio y el tiempo, y nuestros orígenes cósmicos pueden finalmente ser probadas.

Einstein en Drag

En su lucha de una década para formular la teoría general de la relatividad, Einstein buscó inspiración en una variedad de fuentes. La más influyente de todas fue la comprensión de las matemáticas de las formas curvas desarrolladas en el siglo XIX por luminarias matemáticas como Carl Friedrich Gauss, János Bolyai, Nikolai Lobachevsky y Georg Bernhard Riemann. Como discutimos en el capítulo 3, Einstein también se inspiró en las ideas de Ernst Mach. Recuerden que Mach defendía una concepción relacional del espacio: para él, el espacio proporcionaba el lenguaje para especificar la ubicación de un objeto en relación a otro, pero no era en sí mismo una entidad independiente. Inicialmente, Einstein fue un entusiasta defensor de la perspectiva de Mach, porque era lo más relativo que podía ser una teoría que propugnaba la relatividad. Pero a medida que se profundizaba en la comprensión de la relatividad general de Einstein, se dio cuenta de que no incorporaba plenamente las ideas de Mach. Según la relatividad general, el agua en el cubo de Newton, girando en un universo por lo demás vacío, tomaría una forma cóncava, y esto entra en conflicto con la perspectiva puramente relacional de Mach, ya que implica una noción absoluta de aceleración. Aún así, la relatividad general incorpora algunos aspectos del punto de vista de Mach, y en los próximos años un experimento de más de 500 millones de dólares que se ha estado desarrollando durante cerca de cuarenta años pondrá a prueba una de las características más destacadas de Machian.

La física a estudiar se conoce desde 1918, cuando los investigadores austriacos Joseph Lense y Hans Thirring usaron la relatividad general para mostrar que así como un objeto masivo deforma el espacio y el tiempo -como una bola de bolos que descansa en un trampolín-, un objeto rotativo arrastra el espacio (y el tiempo) a su alrededor, como una piedra giratoria sumergida en un cubo de jarabe. Esto se conoce como arrastre *de armazón* e implica, por ejemplo, que un asteroide que caiga libremente hacia una estrella de neutrones de rotación rápida o un agujero negro quedará atrapado en un remolino de espacio giratorio y será azotado mientras viaja hacia abajo. El efecto se llama arrastre de cuadro porque desde el punto de vista del asteroide -desde su marco de referencia- no está siendo azotado en absoluto. En cambio, está cayendo recto hacia abajo a lo largo de la cuadrícula espacial, pero debido a que el espacio se arremolina (como en la figura 14.1) la cuadrícula se tuerce, por lo que el significado de "recto hacia abajo" difiere de lo que se esperaría en base a una perspectiva distante, no arremolinada.

Para ver la conexión con Mach, piense en una versión de arrastre de cuadro en la que el masivo objeto giratorio es una enorme esfera hueca. Los cálculos iniciados en 1912 por Einstein (incluso antes de que completara la relatividad general), que fueron ampliados significativamente en 1965 por Dieter Brill y Jeffrey Cohen, y finalmente completados en 1985 por los físicos alemanes Herbert Pfister y K. Braun, mostraron que el espacio dentro de la esfera hueca sería arrastrado por el movimiento de rotación y puesto en un espín parecido a un remolino. [1] Si un cubo estacionario lleno de agua -estacionaria vista desde un punto de vista distante- se colocara dentro de tal esfera giratoria, los cálculos muestran que el espacio

giratorio ejercería una fuerza sobre el agua estacionaria, haciendo que se eleve por las paredes del cubo y tome una forma cóncava.

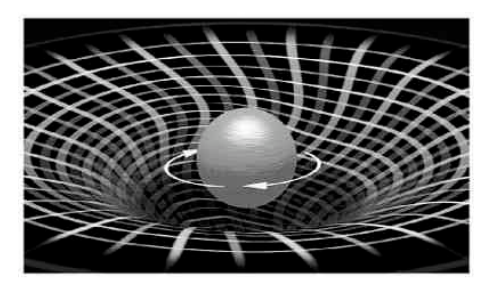


Figura 14.1 Un objeto masivo giratorio arrastra el espacio - los marcos que caen libremente - alrededor de él.

Este resultado habría complacido a Mach sin fin. Aunque no le hubiera gustado la descripción en términos de "espacio giratorio" -ya que esta frase retrata el espacio tiempo como algo- le hubiera resultado extremadamente gratificante que el movimiento giratorio *relativo* entre la esfera y el cubo provoque que la forma del agua cambie. De hecho, para una cáscara que contiene suficiente masa, una cantidad equivalente a la contenida en todo el universo, los cálculos muestran que no importa ni un poco si piensas que la esfera hueca está girando alrededor del cubo, o que el cubo está girando dentro de la esfera hueca. Tal y como Mach defendió, lo único que importa es el movimiento de giro relativo entre los dos. Y como los cálculos a los que me he referido no utilizan nada más que la relatividad general, este es un ejemplo explícito de un rasgo claramente machiano de la teoría de Einstein. (Sin embargo, mientras que el razonamiento estándar de Machian afirmaría que el agua se mantendría plana si el cubo girara en un universo infinito y vacío, la relatividad general no está de acuerdo. Lo que los resultados de Pfister y Braun muestran es que una esfera giratoria suficientemente masiva es capaz de bloquear completamente la influencia habitual del espacio que se encuentra más allá de la propia esfera).

En 1960, Leonard Schiff de la Universidad de Stanford y George Pugh del Departamento de Defensa de los Estados Unidos sugirieron independientemente que la predicción de la relatividad general sobre el arrastre de los marcos podría ser probada experimentalmente usando el movimiento rotacional de la Tierra. Schiff y Pugh se dieron cuenta de que según la física newtoniana, un giroscopio giratorio - una rueda giratoria que está sujeta a un eje - que flota en órbita a gran altura sobre la superficie terrestre, apuntaría en una dirección fija e invariable. Pero, de acuerdo con la relatividad general, su eje giraría muy ligeramente debido al arrastre del espacio por parte de la Tierra. Dado que la masa de la Tierra es insignificante en comparación con la hipotética esfera hueca utilizada en el cálculo de Pfister y Braun anterior, el grado de arrastre de la estructura causado por la rotación de la Tierra es diminuto. Los cálculos detallados mostraron que si el eje

de giro del giroscopio se dirigía inicialmente hacia una estrella de referencia elegida, un año más tarde, el espacio que gira lentamente cambiaría la dirección de su eje en una centésima de grado. Ese es el ángulo que la manecilla de un reloj barre en aproximadamente dos millonésimas de segundo, por lo que su detección presenta un gran desafío científico, tecnológico y de ingeniería.

Cuatro décadas de desarrollo y casi un centenar de tesis doctorales más tarde, un equipo de Stanford dirigido por Francis Everitt y financiado por la NASA está listo para dar el experimento. Durante los próximos años, su satélite *Gravity Probe B*, flotando a 400 millas en el espacio y equipado con cuatro de los giróscopos más estables jamás construidos, intentará medir el arrastre de la estructura causado por la rotación de la Tierra. Si el experimento tiene éxito, será una de las confirmaciones más precisas de la relatividad general jamás lograda, y proporcionará la primera evidencia directa de un efecto de Machian.[2] Igualmente excitante es la posibilidad de que los experimentos detecten una desviación de lo que la relatividad general predice. Una grieta tan pequeña en los cimientos de la relatividad general podría ser justo lo que necesitamos para obtener un vistazo experimental a las características hasta ahora ocultas del espacio tiempo.

Atrapando la Ola

Una lección esencial de la relatividad general es que la masa y la energía hacen que el tejido del espacio tiempo se deforme; lo ilustramos en la Figura 3.10 mostrando el entorno curvo que rodea al sol. Sin embargo, una limitación de una figura fija es que no ilustra cómo las deformaciones y las curvas en el espacio evolucionan cuando la masa y la energía se mueven o cambian de alguna manera su configuración. [3] La relatividad general predice que, al igual que un trampolín asume una forma fija y deformada si se queda perfectamente quieto, pero se eleva cuando salta arriba y abajo, el espacio puede asumir una forma fija y deformada si la materia está perfectamente quieta, como se supone en la figura 3.10, pero las ondulaciones se ondulan a través de su tejido cuando la materia se mueve de un lado a otro. Einstein llegó a esta conclusión entre 1916 y 1918, cuando utilizó las recién formadas ecuaciones de la relatividad general para mostrar que -como las cargas eléctricas que corren arriba y abajo de una antena de radiodifusión producen ondas electromagnéticas (así es como se producen las ondas de radio y televisión)- la materia corre de un lado a otro y que (como en una explosión de supernova) produce ondas gravitacionales. Y como la gravedad es curvatura, una onda gravitacional es una onda de curvatura. Al igual que el lanzamiento de un guijarro a un estanque genera ondas de agua que se extienden hacia el exterior, la materia giratoria genera ondas espaciales que se extienden hacia el exterior; según la relatividad general, una explosión de supernova lejana es como un guijarro cósmico que ha sido lanzado a un estanque espacio-temporal, como se ilustra en la Figura 14.2. La figura destaca una importante característica distintiva

de las ondas gravitatorias: a diferencia de las ondas electromagnéticas, de sonido y de agua -las ondas que viajan *a través del espacio-* las ondas gravitatorias viajan *dentro del* espacio. Son distorsiones viajeras en la geometría del propio espacio.

Aunque las ondas gravitacionales son ahora una predicción aceptada de la relatividad general, durante muchos años el tema se vio envuelto en confusión y controversia, al menos en parte debido a la excesiva adhesión a la filosofía de Machian. Si la relatividad general incorporara plenamente las ideas de Mach, entonces la "geometría del espacio" sería simplemente un lenguaje conveniente para expresar la ubicación y el movimiento de un objeto masivo con respecto a otro. El espacio vacío, en esta forma de pensar, sería un concepto vacío, así que ¿cómo podría ser sensato hablar de un meneo del espacio vacío? Muchos físicos trataron de probar que las supuestas ondas en el espacio equivalían a una mala interpretación de las matemáticas de la relatividad general. Pero a su debido tiempo, los análisis teóricos convergieron en la conclusión correcta: las ondas gravitatorias son reales, y el espacio *puede* ondularse.

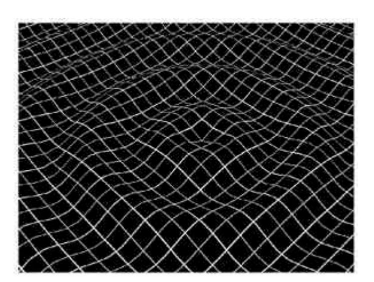


Figura 14.2 Las ondas gravitacionales son ondas en el tejido del espacio tiempo.

Con cada pico y cada depresión que pasa, la geometría distorsionada de una onda gravitacional estiraría el espacio -y todo en él- en una dirección, y luego comprimiría el espacio -y todo en él- en una dirección perpendicular, como en la representación altamente exagerada de la figura 14.3. En principio, se podía detectar el paso de una onda gravitatoria midiendo repetidamente las distancias entre una variedad de lugares y encontrando que las proporciones entre estas distancias habían cambiado momentáneamente.

En la práctica, nadie ha sido capaz de hacerlo, así que nadie ha detectado directamente una onda gravitacional. (Sin embargo, hay pruebas indirectas convincentes de las ondas gravitatorias. [4]) La dificultad es que la influencia distorsionante de una onda gravitatoria que pasa es típicamente diminuta. La bomba atómica probada en Trinidad el 16 de julio de 1945, contenía un golpe equivalente a 20.000 toneladas de TNT y era tan brillante que los testigos que se encontraban a kilómetros de distancia tenían que llevar protección ocular para evitar daños graves por las ondas electromagnéticas que generaba. Sin embargo, incluso si uno estaba parado justo debajo de la torre de acero de cien pies en la que se izó la bomba, las ondas gravitacionales que su explosión produjo habrían

estirado el cuerpo de una manera u otra sólo por una fracción minúscula de un diámetro atómico. Así de débiles son las perturbaciones gravitatorias en comparación, y da una idea de los retos tecnológicos que implica su detección. (Dado que una onda gravitatoria también puede considerarse como un enorme número de gravitones que viajan de forma coordinada, al igual que una onda electromagnética está compuesta por un enorme número de fotones coordinados, esto también da una idea de lo difícil que es detectar un *solo* gravitón).



Figura 14.3 Una onda gravitacional que pasa por delante de un objeto lo estira en un sentido y luego en el otro. (En esta imagen, la escala de distorsión para una onda gravitacional típica es enormemente exagerada).

Por supuesto, no estamos particularmente interesados en detectar las ondas gravitacionales producidas por las armas nucleares, pero la situación con las fuentes astrofísicas no es mucho más fácil. Cuanto más cercana y masiva sea la fuente astrofísica y cuanto más energético y violento sea el movimiento involucrado, más fuertes serán las ondas gravitacionales que recibamos. Pero incluso si una estrella a una distancia de 10.000 años-luz se convirtiera en supernova, como la onda gravitacional resultante pasara por la Tierra, estiraría una varilla de un metro de largo por sólo una millonésima de una billonésima de centímetro, apenas una centésima del tamaño de un núcleo atómico. Por lo tanto, a menos que algún evento astrofísico altamente inesperado de proporciones verdaderamente cataclísmicas ocurriera relativamente cerca, la detección de una onda gravitacional requerirá un aparato capaz de responder a cambios de longitud fantásticamente pequeños.

Los científicos que diseñaron y construyeron el Observatorio de Ondas Gravitatorias con *Interferómetro Láser (LIGO*) (dirigido conjuntamente por el Instituto Tecnológico de California y el Instituto Tecnológico de Massachusetts y financiado por la Fundación Nacional de Ciencias) han estado a la altura del desafío. El LIGO es impresionante y la sensibilidad esperada es asombrosa. Consiste en dos tubos huecos, cada uno de *cuatro kilómetros* de largo y un poco más de un metro de ancho, que están dispuestos en un gigantesco L. La luz láser que simultáneamente derriba los túneles de vacío dentro de cada tubo, y que es reflejada por espejos altamente pulidos, se utiliza para medir la longitud relativa de cada uno con una precisión fantástica. La idea es que si una onda gravitacional pasa, estirará un tubo en relación al otro, y si el estiramiento es lo suficientemente grande, los científicos serán capaces de detectarlo.

Los tubos son largos porque el estiramiento y la compresión logrados por una onda gravitacional son acumulativos. Si una onda gravitacional se estirara algo de cuatro metros de largo por, digamos, 10^{-20} metros, se estiraría algo de cuatro kilómetros de largo por mil veces más, 10^{-17} metros. Por lo tanto, cuanto más largo sea el tramo que se monitoriza, más fácil es detectar un cambio en su longitud. Para capitalizar esto, los experimentadores del LIGO en realidad dirigen los rayos láser para que reboten entre los espejos de los extremos opuestos de cada tubo más de cien veces en cada recorrido, aumentando la distancia de ida y vuelta que se monitoriza a unos 800 kilómetros por rayo. Con tales trucos inteligentes y hazañas de ingeniería, el LIGO debería ser capaz de detectar cualquier cambio en la longitud de los tubos que exceda la trillonésima parte del grosor de un cabello humano, una cienmillonésima parte del tamaño de un átomo.

Oh, y en realidad hay dos de estos dispositivos en forma de L. Uno está en Livingston, Louisiana, y el otro está a unos 2.000 kilómetros en Hanford, Washington. Si una onda gravitatoria de algún ruido astrofísico distante rueda por la tierra, debería afectar a cada detector de forma idéntica, por lo que cualquier onda captada por un experimento debería aparecer también en el otro. Esta es una importante comprobación de consistencia, ya que para todas las precauciones que se han tomado para proteger los detectores, las perturbaciones de la vida cotidiana (el ruido de un camión que pasa, el rechinar de una motosierra, el impacto de la caída de un árbol, etc.) podrían hacerse pasar por ondas gravitacionales. Exigir coincidencias entre detectores distantes sirve para descartar estos falsos positivos.

Los investigadores también han calculado cuidadosamente las frecuencias de las ondas gravitacionales -el número de picos y de fosas que deberían pasar por su detector cada segundo- que esperan sean producidas por una serie de fenómenos astrofísicos, incluyendo las explosiones de supernovas, el movimiento de rotación de las estrellas de neutrones no esféricas y las colisiones entre agujeros negros. Sin esta información, los experimentadores estarían buscando una aguja en un pajar; con ella, pueden enfocar los detectores en una banda de frecuencia muy definida de interés físico. Curiosamente, los cálculos revelan que algunas frecuencias de ondas gravitacionales deberían estar en el rango de unos pocos miles de ciclos por segundo; si fueran ondas de sonido, estarían justo en el rango de la audibilidad humana. Las estrellas de neutrones coalescentes sonarían como un chirrido con un tono rápidamente ascendente, mientras que un par de agujeros negros en colisión imitarían el trino de un gorrión que ha recibido un fuerte golpe en el pecho. Hay una cacofonía de ondas gravitacionales que oscilan a través del tejido del espacio tiempo, y si todo va según lo planeado, el LIGO será el primer instrumento en sintonizar.[5]

Lo que hace todo esto tan excitante es que las ondas gravitacionales maximizan la utilidad de las dos características principales de la gravedad: su debilidad y su ubicuidad. De las cuatro fuerzas, la gravedad interactúa con la materia más

débilmente. Esto implica que las ondas gravitacionales pueden pasar a través de la materia que es opaca a la luz, dando acceso a reinos astrofísicos previamente ocultos. Además, como *todo está sujeto* a la gravedad (mientras que, por ejemplo, la fuerza electromagnética sólo afecta a los objetos que llevan una carga eléctrica), todo tiene la capacidad de generar ondas gravitatorias y, por lo tanto, de producir una firma observable. El LIGO marca así un importante punto de inflexión en la forma en que examinamos el cosmos.

Hubo un tiempo en el que todo lo que podíamos hacer era levantar los ojos y mirar al cielo. En el siglo XVII, Hans Lippershey y Galileo Galilei cambiaron eso; con la ayuda del telescopio, la gran vista del cosmos pasó a ser del dominio de la humanidad. Pero con el tiempo, nos dimos cuenta de que la luz visible representaba una estrecha banda de ondas electromagnéticas. En el siglo XX, con la ayuda de telescopios de infrarrojos, radio, rayos X y rayos gamma, el cosmos se abrió de nuevo a nosotros, revelando maravillas invisibles en las longitudes de onda de luz que nuestros ojos han evolucionado para ver. Ahora, en el siglo XXI, estamos abriendo los cielos una vez más. Con el LIGO y sus subsiguientes mejoras, [39] veremos el cosmos de una forma completamente nueva. En lugar de usar las ondas electromagnéticas, usaremos las ondas gravitacionales; en lugar de usar la fuerza electromagnética, usaremos la fuerza gravitacional.

Para apreciar lo revolucionaria que puede ser esta nueva tecnología, imagínese un mundo en el que los científicos alienígenas acaban de descubrir cómo detectar las ondas electromagnéticas -luz- y piense en cómo su visión del universo cambiaría, en breve, profundamente. Estamos en la cúspide de nuestra primera detección de ondas gravitacionales y por lo tanto podemos estar en una posición similar. Durante milenios hemos mirado en el cosmos; ahora es como si, por primera vez en la historia de la humanidad, lo escucháramos.

La caza de las dimensiones adicionales

Antes de 1996, la mayoría de los modelos teóricos que incorporaban dimensiones adicionales imaginaban que su extensión espacial era aproximadamente planckiana (10^{-33} centímetros). Como esto es diecisiete órdenes de magnitud más pequeño que cualquier cosa resoluble con el equipo disponible actualmente, sin el descubrimiento de una nueva tecnología milagrosa la física planckiana permanecerá fuera de alcance. Pero si las dimensiones adicionales son "grandes", es decir, más grandes que una centésima de una billonésima de una billonésima (10^{-20}) de metro, alrededor de una millonésima del tamaño de un núcleo atómico, hay esperanza.

Como discutimos en el capítulo 13, si alguna de las dimensiones adicionales es "muy grande" -dentro de unos pocos órdenes de magnitud de un milímetro- las mediciones de precisión de la fuerza de la gravedad deberían revelar su

existencia. Estos experimentos se han estado realizando durante unos pocos años y las técnicas se están refinando rápidamente. Hasta ahora no se han encontrado desviaciones de la ley del cuadrado inverso característica de las tres dimensiones del espacio, por lo que los investigadores están presionando para que se reduzcan las distancias. Una señal positiva podría, como mínimo, sacudir los cimientos de la física. Proporcionaría una evidencia convincente de dimensiones adicionales accesibles sólo a la gravedad, y eso daría un fuerte apoyo circunstancial al escenario del mundo de la cuerda/M-TEORIA.

Si las dimensiones adicionales son grandes pero no muy grandes, es poco probable que los experimentos gravitacionales de precisión las detecten, pero siguen existiendo otros enfoques indirectos. Por ejemplo, mencionamos antes que las grandes dimensiones adicionales implicarían que la fuerza intrínseca de la gravedad es mayor de lo que se pensaba anteriormente. La debilidad observada de la gravedad se atribuiría a que se filtra en las dimensiones adicionales, no a que sea fundamentalmente débil; en las escalas de distancias cortas, antes de que se produzca esa filtración, la gravedad sería fuerte. Entre otras implicaciones, esto significa que la creación de pequeños agujeros negros requeriría mucha menos masa y energía que en un universo en el que la gravedad es intrínsecamente mucho más débil. En el Capítulo 13, discutimos la posibilidad de que tales agujeros negros microscópicos pudieran ser producidos por colisiones de alta energía protón-protón en el Gran Colisionador de Hadrones, el acelerador de partículas que se está construyendo actualmente en Ginebra (Suiza), y cuya finalización está prevista para 2007. Es una perspectiva emocionante. Pero hay otra posibilidad tentadora que fue planteada por Alfred Shapere, de la Universidad de Kentucky, y Jonathan Feng, de la Universidad de California en Irvine. Estos investigadores observaron que los rayos cósmicos -partículas elementales que fluyen a través del espacio y bombardean continuamente nuestra atmósfera- también podrían iniciar la producción de agujeros negros microscópicos.

Las partículas de rayos cósmicos fueron descubiertas en 1912 por el científico austriaco Victor Hess; más de nueve décadas después, todavía presentan muchos misterios. Cada segundo, los rayos cósmicos chocan contra la atmósfera e inician una cascada de miles de millones de partículas que drenan hacia abajo y que pasan a través de su cuerpo y el mío; algunas de ellas son detectadas por una variedad de instrumentos dedicados en todo el mundo. Pero nadie está completamente seguro de qué tipos de partículas constituyen los rayos cósmicos que inciden en la atmósfera (aunque existe un consenso cada vez mayor en cuanto a que son protones), y a pesar de que se cree que algunas de estas partículas de alta energía provienen de las explosiones de supernovas, nadie tiene idea de dónde se originan las partículas de rayos cósmicos de mayor energía. Por ejemplo, el 15 de octubre de 1991, el detector de rayos cósmicos Fly's Eye, en el desierto de Utah, midió una partícula que atravesaba el cielo con una energía equivalente a 30.000 millones de masas de protones. Eso es casi tanta energía en una sola partícula subatómica como en una bola rápida de Mariano Rivera, y es

aproximadamente 100 millones de veces el tamaño de las energías de las partículas que serán producidas por el Gran Colisionador de Hadrones.[6] Lo desconcertante es que ningún proceso astrofísico conocido podría producir partículas con tan alta energía; los experimentadores están reuniendo más datos con detectores más sensibles con la esperanza de resolver el misterio.

Para Shapere y Feng, el origen de las partículas de rayos cósmicos superenergéticos era una preocupación secundaria. Se dieron cuenta de que, independientemente del lugar de origen de dichas partículas, si la gravedad en las escalas microscópicas es mucho más fuerte de lo que se pensaba anteriormente, las partículas de rayos cósmicos de mayor energía podrían tener la suficiente fuerza para crear pequeños agujeros negros cuando chocan violentamente contra la atmósfera superior.

Al igual que con su producción en los destructores de átomos, estos pequeños agujeros negros no supondrían ningún peligro para los experimentadores o para el mundo en general. Después de su creación, se desintegrarían rápidamente, enviando una cascada característica de otras partículas más ordinarias. De hecho, los agujeros negros microscópicos tendrían una vida tan corta que los experimentadores no los buscarían directamente; en su lugar, buscarían pruebas de agujeros negros a través de estudios detallados de las lluvias de partículas resultantes que llovieran sobre sus detectores. El más sensible de los detectores de rayos cósmicos del mundo, el Observatorio Pierre Auger -con un área de observación del tamaño de la Isla de Rodas- se está construyendo ahora en una vasta extensión de tierra en el oeste de Argentina. Shapere y Feng estiman que si todas las dimensiones adicionales son tan grandes como 10^{-14} metros, entonces después de un año de recolección de datos, el detector Auger verá los característicos desechos de partículas de alrededor de una docena de pequeños agujeros negros producidos en la atmósfera superior. Si no se encuentran tales firmas de agujeros negros, el experimento concluirá que las dimensiones adicionales son más pequeñas. Encontrar los restos de los agujeros negros producidos en las colisiones de rayos cósmicos es ciertamente una apuesta arriesgada, pero el éxito abriría la primera ventana experimental sobre dimensiones adicionales, agujeros negros, teoría de cuerdas y gravedad cuántica.

Más allá de la producción de agujeros negros, hay otra forma, basada en el acelerador, que los investigadores buscarán en la próxima década. La idea es una variante sofisticada de la explicación "espacio entre los cojines" para las monedas sueltas que faltan en el bolsillo.

Un principio central de la física es la conservación de la energía. La energía puede manifestarse de muchas formas: la energía cinética del movimiento de una pelota cuando vuela de un bate de béisbol, la energía potencial gravitatoria cuando la pelota vuela hacia arriba, la energía de sonido y calor cuando la pelota golpea el suelo y excita todo tipo de movimiento vibratorio, la energía de masa que está

encerrada dentro de la propia pelota, y así sucesivamente, pero cuando se han contabilizado todos los portadores de energía, la cantidad con la que terminas siempre es igual a la cantidad con la que empezaste.[7] Hasta la fecha, ningún experimento contradice esta ley del equilibrio perfecto de la energía.

Pero dependiendo del tamaño preciso de las dimensiones adicionales hipotéticas, los experimentos de alta energía que se llevarán a cabo en la recién remodelada instalación del Fermilab y en el Gran Colisionador de Hadrones pueden revelar procesos que parecen violar la conservación de la energía: la energía al final de una colisión puede ser menor que la energía al principio.

La razón es que, al igual que las monedas que faltan, la energía (transportada por los gravitones) puede filtrarse en las grietas -el minúsculo espacio adicional- que proporcionan las dimensiones adicionales y, por lo tanto, puede pasarse por alto inadvertidamente en el cálculo de la contabilidad de la energía. La posibilidad de tal "señal de energía perdida" proporciona otro medio para establecer que el tejido del cosmos tiene una complejidad mucho más allá de lo que podemos ver directamente.

Sin duda, cuando se trata de dimensiones adicionales, soy parcial. He trabajado en aspectos de las dimensiones adicionales durante más de quince años, así que ocupan un lugar especial en mi corazón. Pero, con esa confesión como calificativo, me resulta difícil imaginar un descubrimiento que sea más emocionante que encontrar pruebas de dimensiones más allá de las tres con las que todos estamos familiarizados. En mi opinión, no hay actualmente ninguna otra propuesta seria cuya confirmación sacudiría tan profundamente los cimientos de la física y establecería tan completamente que debemos estar dispuestos a cuestionar elementos básicos, aparentemente evidentes, de la realidad.

La teoría de Higgs, la supersimetría y la teoría de las cuerdas

Más allá de los desafíos científicos de buscar en lo desconocido, y la posibilidad de encontrar evidencia de dimensiones adicionales, hay un par de motivaciones específicas para las recientes mejoras en el acelerador del Fermilab y para la construcción del gigantesco Gran Colisionador de Hadrones. Una es encontrar partículas de Higgs. Como discutimos en el capítulo 9, las elusivas partículas de Higgs serían los componentes más pequeños de un campo de Higgs, un campo, según la hipótesis de los físicos, que forma el océano de Higgs y por lo tanto da masa a las otras especies de partículas fundamentales. Los estudios teóricos y experimentales actuales sugieren que el Higgs debería tener una masa en el rango de cien a mil veces la masa del protón. Si el extremo inferior de este rango resulta ser correcto, el Fermilab tiene una posibilidad razonablemente buena de descubrir una partícula de Higgs en un futuro próximo. Y ciertamente, si el Fermilab falla y si el rango de masas estimado es sin embargo correcto, el Gran Colisionador de Hadrones debería producir muchas partículas de Higgs para el final de la década. La detección de las partículas Higgs sería un hito importante, ya que confirmaría la existencia de una especie de campo que los físicos teóricos de partículas y los cosmólogos han invocado durante décadas, sin ninguna evidencia experimental de apoyo.

Otro objetivo importante del Fermilab y del Gran Colisionador de Hadrones es detectar pruebas de supersimetría. Recordemos el capítulo 12 que la supersimetría empareja partículas cuyos giros difieren en media unidad y es una idea que surgió originalmente de los estudios de la teoría de cuerdas a principios

de los años 70. Si la supersimetría es relevante para el mundo real, entonces para cada especie de partícula conocida con espín- ^{1}/2 debería haber una especie compañera con espín-0; para cada especie de partícula conocida con espín-1, debería haber una especie compañera con espín- ^{1}/2. Por ejemplo, para el electrón de espín ^{1}/2 debería haber una especie de espín-0 llamada electrón supersimétrico*,* o *selectrón* para abreviar; para los quarks de espín ^{1}/2 debería haber quarks supersimétricos, o squarks; para los neutrinos de espín 1 /2 debería haber sneutrinos de espín-0; para los gluones, fotones y partículas W y Z de espín-1 debería haber gluinos, fotinos y winos y *zinos de espín* ^{1}/2. (Sí, los físicos se dejan llevar.)

Nadie ha detectado nunca ninguno de estos supuestos doppelgängers, y la explicación, esperan los físicos con los dedos cruzados, es que las partículas supersimétricas son sustancialmente más pesadas que sus homólogas conocidas. Las consideraciones teóricas sugieren que las partículas supersimétricas podrían ser mil veces más masivas que un protón, y en ese caso su ausencia en los datos experimentales no sería misteriosa: los rompedores de átomos existentes no tienen la potencia adecuada para producirlos. En la próxima década esto cambiará. El recién mejorado acelerador del Fermilab ya tiene una oportunidad de descubrir algunas partículas supersimétricas. Y, como con el Higgs, si el Fermilab no encuentra evidencia de supersimetría y si el rango de masa esperado de las partículas supersimétricas es bastante exacto, el Gran Colisionador de Hadrones debería producirlas con facilidad.

La confirmación de la supersimetría sería el desarrollo más importante en la física de partículas elementales en más de dos décadas. Establecería el siguiente paso en nuestra comprensión más allá del exitoso modelo estándar de la física de partículas y proporcionaría pruebas circunstanciales de que la teoría de cuerdas va por buen camino. Pero tenga en cuenta que no probaría la teoría de cuerdas en sí misma. Aunque la supersimetría fue descubierta en el curso del desarrollo de la teoría de cuerdas, los físicos hace tiempo que se dieron cuenta de que la supersimetría es un principio más general que puede ser fácilmente incorporado en los enfoques tradicionales de punto-partícula. La confirmación de la supersimetría establecería un elemento vital del marco de la teoría de las cuerdas y guiaría mucha de la investigación posterior, pero no sería la pistola humeante de la teoría de las cuerdas.

Por otro lado, si el escenario del mundo de las marcas es correcto, los próximos experimentos con aceleradores tienen el potencial de confirmar la teoría de las cuerdas. Como se mencionó brevemente en el Capítulo 13, si las dimensiones adicionales en el escenario del mundo de salvamento fueran tan grandes como 10^{-16} centímetros, no sólo la gravedad sería intrínsecamente más fuerte de lo que se pensaba anteriormente, sino que las cuerdas también serían significativamente más largas. Puesto que las cuerdas más largas son menos rígidas, requieren menos energía para vibrar. Mientras que en el marco convencional de las cuerdas,

los patrones de vibración de las mismas tendrían energías que están más de un millón de billones de veces más allá de nuestro alcance experimental, en el escenario de Braneworld las energías de los patrones de vibración de las cuerdas podrían ser tan bajas como *mil* veces la masa del protón. Si este fuera el caso, las colisiones de alta energía en el Gran Colisionador de Hadrones serán similares a una pelota de golf bien golpeada que rebota en el interior de un piano; las colisiones tendrán suficiente energía para excitar muchas "octavas" de patrones de vibración de cuerdas. Los experimentadores detectarían una panoplia de nuevas partículas, nunca antes vistas, nuevos patrones de vibración de cuerdas, es decir, cuyas energías corresponderían a las resonancias armónicas de la teoría de cuerdas.

Las propiedades de estas partículas y las relaciones entre ellas mostrarían inequívocamente que todas son parte de la misma partitura cósmica, que todas son diferentes pero relacionadas, que todas son patrones de vibración distintos de un solo tipo de objeto: una cuerda. En el futuro previsible, este es el escenario más probable para una confirmación directa de la teoría de las cuerdas.

Orígenes cósmicos

Como vimos en capítulos anteriores, la radiación cósmica de fondo de microondas ha jugado un papel dominante en la investigación cosmológica desde su descubrimiento a mediados de la década de 1960. La razón es clara: en las primeras etapas del universo, el espacio estaba lleno de un baño de partículas cargadas eléctricamente -electrones y protones- que, a través de la fuerza electromagnética, golpeaban incesantemente los fotones de un lado a otro. Pero apenas 300.000 años después del estallido (ATB), el universo se enfrió lo suficiente como para que los electrones y protones se combinaran en átomos eléctricamente neutros, y a partir de ese momento, la radiación ha viajado por el espacio, en su mayor parte sin ser perturbada, proporcionando una aguda imagen del universo primitivo. Hay aproximadamente 400 millones de estos fotones de microondas cósmicos primordiales fluyendo a través de cada metro cúbico de espacio, reliquias prístinas del universo temprano.

Las mediciones iniciales de la radiación de fondo de microondas revelaron que su temperatura era notablemente uniforme, pero como discutimos en el Capítulo 11, una inspección más detallada, lograda por primera vez en 1992 por el Explorador del Fondo Cósmico (COBE) y desde entonces mejorada por una serie de emprendimientos de observación, encontró evidencia de pequeñas variaciones de temperatura, como se ilustra en la Figura 14.4a. Los datos están codificados en escala de grises, con parches claros y oscuros que indican variaciones de temperatura de unas pocas diez milésimas de grado. Las manchas de la figura

muestran la diminuta pero innegable desigualdad real de la temperatura de la radiación en el cielo.

Si bien es un descubrimiento impresionante por sí mismo, el experimento del COBE también marcó un cambio fundamental en el carácter de la investigación cosmológica. Antes de la COBE, los datos cosmológicos eran toscos. A su vez, una teoría cosmológica se consideraba viable si podía coincidir con las características generales de las observaciones astronómicas. Los teóricos podían proponer un esquema tras otro con una mínima consideración para satisfacer las limitaciones de la observación. Simplemente no había muchas limitaciones de observación, y las que existían no eran particularmente precisas. Pero el COBE inició una nueva era en la que las normas se han endurecido considerablemente. Ahora hay un creciente cuerpo de datos de precisión con los que cualquier teoría debe contar con éxito incluso para ser considerada. En 2001, el satélite Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP), una empresa conjunta de la NASA y la Universidad de Princeton, fue lanzado para medir la radiación de fondo de las microondas con una resolución y sensibilidad unas cuarenta veces mayor que la del COBE. Comparando los resultados iniciales del WMAP, Figura 14.4b, con los del COBE, Figura 14.4a, se puede ver inmediatamente cuán más fina y detallada es la imagen que puede proporcionar el WMAP. Otro satélite, *Planck,* que está siendo desarrollado por la Agencia Espacial Europea, está programado para ser lanzado en 2007, y si todo va según lo previsto, mejorará la resolución del WMAP en un factor de diez.

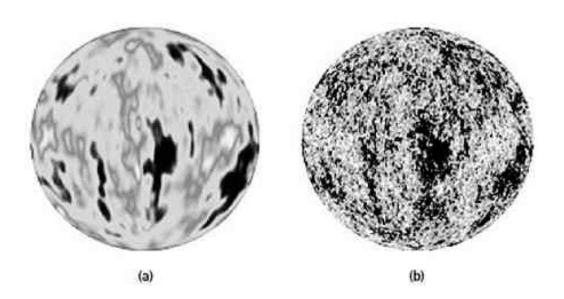


Figura 14.4 a) Datos sobre la radiación cósmica de fondo de microondas reunidos por el satélite COBE. La radiación ha estado viajando por el espacio sin obstáculos desde unos 300.000 años después del big bang, por lo que esta imagen muestra las diminutas variaciones de temperatura presentes en el universo hace casi 14.000 millones de años. b) Mejora de los datos recogidos por el satélite WMAP.

El influjo de datos de precisión ha hecho que el campo de las propuestas cosmológicas se haya reducido, siendo el modelo inflacionario, de lejos, el principal contendiente. Pero como mencionamos en el capítulo 10, la cosmología inflacionaria no es una teoría única. Los teóricos han propuesto *muchas* versiones diferentes (inflación antigua, inflación nueva, inflación cálida, inflación híbrida,

hiperinflación, inflación asistida, inflación eterna, inflación extendida, inflación caótica, doble inflación, inflación de escala débil, inflación hipernatural, por nombrar sólo algunas), cada una de las cuales implica la característica breve ráfaga de expansión rápida, pero todas difieren en los detalles (en el número de campos y sus formas de energía potencial, en las que los campos se encaraman en mesetas, etc.). Estas diferencias dan lugar a predicciones ligeramente diferentes para las propiedades de la radiación de fondo de microondas (diferentes campos con diferentes energías tienen fluctuaciones cuánticas ligeramente diferentes). La comparación con los datos de WMAP y Planck debería poder descartar muchas propuestas, refinando sustancialmente nuestra comprensión.

De hecho, los datos pueden ser capaces de adelgazar aún más el campo. Aunque las fluctuaciones cuánticas estiradas por la expansión inflacionaria proporcionan una explicación convincente de las variaciones de temperatura observadas, este modelo tiene un competidor. El modelo cosmológico cíclico de Steinhardt y Turok, descrito en el Capítulo 13, ofrece una propuesta alternativa. A medida que las dos tres ramas del modelo cíclico se dirigen lentamente una hacia la otra, las fluctuaciones cuánticas hacen que las diferentes partes se acerquen a ritmos ligeramente diferentes. Cuando finalmente se chocan entre sí, aproximadamente un billón de años después, diferentes lugares de las branas se pondrán en contacto en momentos ligeramente diferentes, como si dos trozos de papel de lija gruesa se chocaran entre sí. Las diminutas desviaciones de un impacto perfectamente uniforme producen diminutas desviaciones de una evolución perfectamente uniforme a través de cada brana. Dado que una de estas branas se supone que es nuestro espacio tridimensional, las desviaciones de la uniformidad son desviaciones que deberíamos ser capaces de detectar. Steinhardt, Turok y sus colaboradores han argumentado que las inhomogeneidades generan desviaciones de temperatura de la misma forma que las que surgen del marco inflacionario, y por lo tanto, con los datos actuales, el modelo cíclico ofrece una explicación igualmente viable de las observaciones.

Sin embargo, los datos más refinados que se están reuniendo en el próximo decenio tal vez permitan distinguir entre los dos enfoques. En el marco inflacionario, no sólo se estiran las fluctuaciones cuánticas del campo de inflado por el estallido de la expansión exponencial, sino que también se generan diminutas ondulaciones cuánticas en el tejido espacial por el intenso estiramiento hacia afuera. Dado que las ondulaciones en el espacio no son más que ondas gravitatorias (como en nuestra anterior discusión sobre el LIGO), el marco inflacionario predice que las ondas gravitatorias se produjeron en los primeros momentos del universo.[8] [A] menudo se llaman ondas gravitacionales primordiales, para distinguirlas de las generadas más recientemente por eventos astrofísicos violentos. En el modelo cíclico, por el contrario, la desviación de la uniformidad perfecta se construye suavemente, en el transcurso de un tiempo casi insondable, mientras que las branas pasan un billón de años dirigiéndose lentamente hacia su siguiente salpicadura. La ausencia de un cambio rápido y vigoroso en la geometría

de las branas, y en la geometría del espacio, significa que *no se* generan ondas espaciales, por lo que el modelo cíclico predice una ausencia de ondas gravitatorias primordiales. Así pues, si se detectan las ondas gravitatorias cosmológicas primordiales, será un triunfo más para el marco inflacionario y descartará definitivamente el enfoque cíclico.

Es poco probable que el LIGO sea lo suficientemente sensible para detectar las ondas gravitatorias previstas de la inflación, pero es posible que sean observadas indirectamente por Planck o por otro experimento satelital llamado Experimento de Polarización del Fondo Cósmico de Microondas (CMBPol) que se está planificando actualmente. Planck, y el CMBPol en particular, no se centrará únicamente en las variaciones de temperatura de la radiación de fondo de microondas, sino que también medirá *la polarización, es decir,* las direcciones medias de giro de los fotones de microondas detectados. A través de una cadena de razonamientos demasiado complicada para cubrirla aquí, resulta que las ondas gravitatorias del estallido dejarían una huella distintiva en la polarización de la radiación de fondo de microondas, tal vez una huella lo suficientemente grande como para ser medida.

Así que, dentro de una década, podremos tener una idea clara de si el estallido fue realmente una salpicadura, y si el universo que conocemos es realmente una triple brana. En la edad de oro de la cosmología, algunas de las ideas más descabelladas pueden ser realmente comprobables.

La materia oscura, la energía oscura y el futuro del universo

En el capítulo 10 repasamos la fuerte evidencia teórica y de observación que indica que un mero 5 por ciento del peso del universo proviene de los componentes que se encuentran en la materia familiar -protones y neutrones (los electrones representan menos del 0,05 por ciento de la masa de la materia ordinaria)- mientras que el 25 por ciento proviene de la materia oscura y el 70 por ciento de la energía oscura. Pero todavía hay una gran incertidumbre sobre la identidad detallada de toda esta materia oscura. Una suposición natural es que la materia oscura también está compuesta de protones y neutrones, los que de alguna manera evitaron agruparse para formar estrellas emisoras de luz. Pero otra consideración teórica hace que esta posibilidad sea muy poco probable.

A través de observaciones detalladas, los astrónomos tienen un claro conocimiento de las abundancias relativas medias de los elementos ligeros -hidrógeno, helio, deuterio y litio- que están dispersos por todo el cosmos. Con un alto grado de precisión, las abundancias coinciden con los cálculos teóricos de los procesos que se cree que han sintetizado estos núcleos durante los primeros minutos del universo. Este acuerdo es uno de los grandes éxitos de la cosmología teórica moderna. Sin embargo, estos cálculos suponen que la mayor parte de la

materia oscura *no* está compuesta de protones y neutrones; si, en las escalas cosmológicas, los protones y los neutrones fueran un constituyente dominante, la receta cósmica se desecha y los cálculos dan resultados que se descartan por las observaciones.

Entonces, si no son protones y neutrones, ¿qué constituye la materia oscura? A día de hoy, nadie lo sabe, pero no hay escasez de propuestas. Los nombres de los candidatos van desde los axiones hasta los zinos, y quien encuentre la respuesta seguramente hará una visita a Estocolmo. El hecho de que nadie haya detectado aún una partícula de materia oscura limita considerablemente cualquier propuesta. La razón es que la materia oscura no sólo está situada en el espacio, sino que está distribuida por todo el universo y por lo tanto también está flotando por nosotros aquí en la tierra. Según muchas de las propuestas, en este momento miles de millones de partículas de materia oscura están atravesando su cuerpo cada segundo, por lo que los candidatos viables son sólo aquellas partículas que pueden atravesar la materia voluminosa sin dejar un rastro significativo.

Los neutrinos son una posibilidad. Los cálculos estiman su abundancia de reliquias desde que se produjeron en el big bang, en unos 55 millones por metro cúbico de espacio, por lo que si cualquiera de las tres especies de neutrinos pesara una centésima de millonésima (10^{-8}) tanto como un protón, suministrarían la materia oscura. Aunque experimentos recientes han dado fuertes pruebas de que los neutrinos tienen masa, según los datos actuales son demasiado ligeros para suministrar la materia oscura; se quedan cortos por un factor de más de cien.

Otra propuesta prometedora se refiere a las partículas supersimétricas, especialmente el fotón*,* el *zino* y el *higgsino* (los socios del fotón, el Z y el Higgs). Estas son las más distantes de las partículas supersimétricas, ya que podrían pasar despreocupadamente por toda la Tierra sin el más mínimo efecto sobre su movimiento y, por lo tanto, podrían haber escapado fácilmente a la detección. [9] A partir de los cálculos de cuántas de estas partículas se habrían producido en el big bang y habrían sobrevivido hasta hoy, los físicos estiman que necesitarían tener una masa del orden de 100 a 1.000 veces la del protón para suministrar la materia oscura. Este es un número intrigante, porque varios estudios de modelos de partículas supersimétricas así como de teoría de supercuerdas han llegado al mismo rango de masa para estas partículas, sin ninguna preocupación por la materia oscura o la cosmología. Esto sería una confluencia desconcertante y completamente inexplicable, a menos, por supuesto, que la materia oscura esté realmente compuesta de partículas supersimétricas. Por lo tanto, la búsqueda de partículas supersimétricas en los aceleradores actuales y pendientes del mundo también puede verse como una búsqueda de los candidatos a materia oscura más favorecidos.

Desde hace algún tiempo también se están realizando búsquedas más directas de las partículas de materia oscura que fluyen por la Tierra, aunque son experimentos

extremadamente difíciles. Del millón o más de partículas de materia oscura que deberían estar pasando a través de un área del tamaño de un cuarto cada segundo, como máximo una por día dejaría cualquier evidencia en el equipo especialmente diseñado que varios experimentadores han construido para detectarlas. Hasta la fecha, no se ha logrado una detección confirmada de una partícula de materia oscura.[10] Con el premio todavía muy en el aire, los investigadores están avanzando con mucha intensidad. Es muy posible que en los próximos años, la identidad de la materia oscura se establezca.

La confirmación definitiva de la existencia de la materia oscura, y la determinación directa de su composición, sería un gran avance. Por primera vez en la historia, aprenderíamos algo que es a la vez completamente básico y sorprendentemente esquivo: la composición de la gran mayoría del contenido material del universo.

De todos modos, como vimos en el capítulo 10, los datos recientes sugieren fuertemente que incluso con la identificación de la materia oscura, todavía habría un giro significativo en la trama que necesitaría un examen experimental: las observaciones de supernovas que dan evidencia de una constante cosmológica de empuje hacia afuera que representa el 70 por ciento de la energía total del universo. Como el descubrimiento más excitante e inesperado de la última década, la evidencia de una constante cosmológica, una energía que impregna el espacio, necesita una confirmación vigorosa y hermética. Se han planificado o ya están en marcha varios enfoques.

Los experimentos de fondo de microondas también juegan un papel importante aquí. El tamaño de las manchas de la figura 14.4 - donde, de nuevo, cada mancha es una región de temperatura uniforme - refleja la forma general del tejido espacial. Si el espacio tuviera forma de esfera, como en la figura 8.6a, la hinchazón exterior haría que las manchas fueran un poco más grandes de lo que son en la figura 14.4b; si el espacio tuviera forma de silla de montar, como en la figura 8.6c, la contracción interior haría que las manchas fueran un poco más pequeñas; y si el espacio fuera plano, como en la figura 8.6b, el tamaño de la mancha estaría en medio. Las mediciones de precisión iniciadas por el COBE y desde entonces mejoradas por el WMAP apoyan firmemente la proposición de que el espacio es *plano.* Esto no sólo coincide con las expectativas teóricas que provienen de los modelos inflacionarios, sino que también concuerda perfectamente con los resultados de las supernovas. Como hemos visto, un universo espacialmente plano requiere que la densidad total de masa/energía sea igual a la densidad crítica. Con la materia ordinaria y la oscura contribuyendo alrededor del 30 por ciento y la energía oscura contribuyendo alrededor del 70 por ciento, todo cuelga junto de manera impresionante.

Una confirmación más directa de los resultados de la supernova es el objetivo de la sonda de aceleración SuperNova (SNAP). Propuesto por los científicos del Laboratorio Lawrence Berkeley, el SNAP sería un telescopio de órbita satelital con

capacidad para observar y medir más de veinte veces el número de supernovas estudiadas hasta ahora. El SNAP no sólo podría confirmar el resultado anterior de que el 70% del universo es energía oscura, sino que también debería ser capaz de determinar la naturaleza de la energía oscura con mayor precisión.

Verán, aunque he descrito la energía oscura como una versión de la constante cosmológica de Einstein, una energía constante e invariable que empuja al espacio a expandirse, hay una posibilidad estrechamente relacionada pero alternativa. Recuerden de nuestra discusión sobre la cosmología inflacionaria (y la rana saltarina) que un campo cuyo valor está por encima de su configuración de energía más baja puede actuar como una constante cosmológica, impulsando una expansión acelerada del espacio, pero típicamente lo hará sólo por un corto tiempo. Tarde o temprano, el campo encontrará su camino hacia el fondo de su potencial tazón de energía, y el empuje hacia afuera desaparecerá. En la cosmología inflacionaria, esto ocurre en una diminuta fracción de segundo. Pero al introducir un nuevo campo y al elegir cuidadosamente su forma de energía potencial, los físicos han encontrado formas para que la expansión acelerada sea mucho más suave en su empuje hacia afuera pero que dure mucho más tiempo, para que el campo impulse una fase acelerada comparativamente lenta y constante de expansión espacial que dure no una fracción de segundo, sino miles de millones de años, a medida que el campo rueda lentamente hasta el valor de energía más bajo. Esto plantea la posibilidad de que, en este momento, podamos estar experimentando una versión extremadamente suave del estallido inflacionario que se cree que ocurrió durante los primeros momentos del universo.

La diferencia entre una verdadera constante cosmológica y esta última posibilidad, conocida como *quintaesencia,* es de mínima importancia hoy en día, pero tiene un profundo efecto en el futuro a largo plazo del universo. Una constante cosmológica es *constante* - proporciona una expansión acelerada sin fin, por lo que el universo se expandirá cada vez más rápido y se hará cada vez más extendido, diluido y estéril. Pero la quintaesencia proporciona una expansión acelerada que en algún momento llega a su fin, sugiriendo un futuro lejano menos sombrío y desolado que el que sigue a la expansión acelerada que es eterna. Al medir los cambios en la aceleración del espacio en largos períodos de tiempo (a través de observaciones de supernovas a varias distancias y, por tanto, en varios momentos del pasado), el SNAP puede ser capaz de distinguir entre las dos posibilidades. Al determinar si la energía oscura es realmente una constante cosmológica, SNAP dará una idea del destino a largo plazo del universo.

Espacio, tiempo y especulación

El viaje para descubrir la naturaleza del espacio y el tiempo ha sido largo y lleno de muchas sorpresas; sin duda está todavía en sus primeras etapas. Durante los

últimos siglos, hemos visto un avance tras otro, reformar radicalmente nuestras concepciones del espacio y el tiempo y volver a darles forma. Las propuestas teóricas y experimentales que hemos cubierto en este libro representan la escultura de nuestra generación de estas ideas, y probablemente será una parte importante de nuestro legado científico. En el capítulo 16, discutiremos algunos de los avances más recientes y especulativos en un esfuerzo por arrojar luz sobre lo que podrían ser los próximos pasos del viaje. Pero primero, en el capítulo 15, especularemos en una dirección diferente.

Aunque no hay un patrón establecido para el descubrimiento científico, la historia muestra que la comprensión profunda es a menudo el primer paso hacia el control tecnológico. La comprensión de la fuerza electromagnética en el siglo XIX condujo finalmente al telégrafo, la radio y la televisión. Con ese conocimiento, junto con la posterior comprensión de la mecánica cuántica, fuimos capaces de desarrollar computadoras, láseres y aparatos electrónicos demasiado numerosos para mencionarlos. La comprensión de las fuerzas nucleares condujo a un peligroso dominio de las armas más poderosas que el mundo haya conocido jamás, y al desarrollo de tecnologías que algún día podrían satisfacer todas las necesidades energéticas del mundo con nada más que cubas de agua salada. ¿Podría nuestra comprensión cada vez más profunda del espacio y el tiempo ser el primer paso en un patrón similar de descubrimiento y desarrollo tecnológico? ¿Seremos algún día los amos del espacio y el tiempo y haremos cosas que por ahora son sólo parte de la ciencia ficción?

Nadie lo sabe. Pero veamos hasta dónde hemos llegado y lo que podría ser necesario para tener éxito.

15 - Teletransportadores y máquinas del tiempo

VIAJANDO A TRAVÉS DEL ESPACIO Y EL TIEMPO

Tal vez me faltó imaginación en los años 60, pero lo que realmente me pareció increíble fue la computadora a bordo del *Enter Prise*. Mi sensibilidad escolar me dio licencia poética para el motor de curvatura y un universo poblado por alienígenas que hablan inglés con fluidez. Pero una máquina que pudiera - bajo demanda - mostrar inmediatamente una imagen de cualquier figura histórica que haya vivido, dar especificaciones técnicas para cualquier equipo que se haya construido, o proporcionar acceso a cualquier libro que se haya escrito? *Eso puso a prueba* mi capacidad de suspender la incredulidad. A finales de los 60, este preadolescente estaba seguro de que nunca habría una forma de reunir, almacenar y dar acceso inmediato a tal riqueza de información. Y sin embargo,

menos de medio siglo después, puedo sentarme aquí en mi cocina con una computadora portátil, conexión inalámbrica a Internet y software de reconocimiento de voz y jugar a Kirk, hojeando un vasto almacén de conocimientos -desde lo fundamental hasta lo pueril- sin mover un dedo. Es cierto que la velocidad y la eficiencia de las computadoras representadas en el mundo del siglo XXIII de *Star Trek* es todavía envidiable, pero es fácil prever que cuando llegue esa época, nuestra tecnología habrá superado las expectativas imaginadas.

Este ejemplo no es más que uno de los muchos que han hecho un cliché de la capacidad de la ciencia ficción para presagiar el futuro. Pero, ¿cuál es el más tentador de todos los dispositivos de la trama, aquel en el que alguien entra en una cámara, acciona un interruptor y es transportado a un lugar lejano o a un tiempo diferente? ¿Es posible que algún día nos liberemos de la escasa expansión espacial y de la época temporal a la que hemos estado confinados hasta ahora y exploremos los más lejanos confines del espacio y el tiempo? ¿O esta distinción entre la ciencia ficción y la realidad permanecerá para siempre claramente trazada? Habiendo sido ya expuesto a mi fracaso infantil para anticipar la revolución de la información, podría cuestionar mi capacidad para adivinar futuros avances tecnológicos. Así pues, en lugar de especular sobre la probabilidad de lo que podría ser, en este capítulo describiré hasta dónde hemos llegado realmente, tanto en la teoría como en la práctica, para realizar teletransportadores y máquinas del tiempo, y lo que se necesitaría para ir más lejos y lograr el control del espacio y el tiempo.

Teletransportación en un mundo cuántico

En las representaciones convencionales de ciencia ficción, un *teletransportador* (o, en la jerga de *Star Trek*, un *transportador*) escanea un objeto para determinar su composición detallada y envía la información a un lugar distante, donde el objeto se reconstituye. El hecho de que el objeto en sí mismo se "desmaterialice", de que sus átomos y moléculas se envíen junto con el plano para volver a unirlos, o de que los átomos y moléculas situados en el extremo receptor se utilicen para construir una réplica exacta del objeto, varía de una encarnación ficticia a otra. Como veremos, el enfoque científico de la teletransportación desarrollado en la última década está más cerca en espíritu de esta última categoría, y esto plantea dos cuestiones esenciales. La primera es un enigma filosófico estándar pero espinoso: ¿Cuándo, si es que alguna vez, debe identificarse, llamarse, considerarse o tratarse una réplica exacta como si fuera el original? La segunda es la cuestión de si es posible, incluso en principio, examinar un objeto y determinar su composición con total exactitud para poder elaborar un plano perfecto con el que reconstruirlo.

En un universo gobernado por las leyes de la física clásica, la respuesta a la segunda pregunta sería sí. En principio, los atributos de cada partícula que compone un objeto - la identidad, posición, velocidad de cada partícula, etc. - podrían ser medidos con total precisión, transmitidos a un lugar distante, y utilizados como un manual de instrucciones para recrear el objeto. Hacer esto para un objeto compuesto por más de un puñado de partículas elementales sería ridículo, pero en un universo clásico, el obstáculo sería la complejidad, no la física.

En un universo gobernado por las leyes de la física cuántica -nuestro universo- la situación es mucho más sutil. Hemos aprendido que el acto de medir induce a uno de los innumerables atributos potenciales de un objeto a salir de la neblina cuántica y tomar un valor definido. Cuando observamos una partícula, por ejemplo, los rasgos definidos que vemos no reflejan generalmente la mezcla cuántica borrosa de atributos que tenía un momento antes de que miráramos. [1] Por lo tanto, si queremos replicar un objeto, nos enfrentamos a un Catch-22 cuántico. Para replicar debemos observar, así que sabemos qué replicar. Pero el acto de la observación provoca un cambio, así que si replicamos lo que vemos, no replicaremos lo que estaba allí antes de que miráramos. Esto sugiere que la teletransportación en un universo cuántico es inalcanzable, no sólo por las limitaciones prácticas derivadas de la complejidad, sino por las limitaciones fundamentales inherentes a la física cuántica. Sin embargo, como veremos en la siguiente sección, a principios de los años 90 un equipo internacional de físicos encontró una forma ingeniosa de eludir esta conclusión.

En cuanto a la primera pregunta, en cuanto a la relación entre la réplica y el original, la física cuántica da una respuesta que es a la vez precisa y alentadora. Según la mecánica cuántica, cada electrón del universo es idéntico a todos los demás, en el sentido de que todos tienen exactamente la misma masa, exactamente la misma carga eléctrica, exactamente las mismas propiedades de fuerza nuclear débil y fuerte, y exactamente el mismo espín total. Además, nuestra bien probada descripción de la mecánica cuántica dice que éstas *agotan* los atributos que un electrón puede poseer; los electrones son todos idénticos en lo que respecta a estas propiedades, y no hay otras propiedades a considerar. En el mismo sentido, cada up-quark es igual a otro, cada down-quark es igual a otro, cada fotón es igual a otro, y así sucesivamente para todas las otras especies de partículas. Como reconocieron los practicantes cuánticos hace muchas décadas, se puede pensar que las partículas son los paquetes más pequeños posibles de un campo (por ejemplo, los fotones son los paquetes más pequeños del campo electromagnético), y la física cuántica muestra que esos componentes más pequeños del mismo campo son siempre idénticos. (O, en el marco de la teoría de las cuerdas, las partículas de la misma especie tienen propiedades idénticas porque son vibraciones idénticas de una sola especie de cuerda).

Lo que puede diferir entre dos partículas de la misma especie son las probabilidades de que estén ubicadas en varias posiciones, las probabilidades de

que sus giros apunten en direcciones particulares y las probabilidades de que tengan velocidades y energías particulares. O, como dicen los físicos más sucintamente, las dos partículas pueden estar en diferentes *estados cuánticos.* Pero si dos partículas de la misma especie están en el mismo estado cuántico -excepto, posiblemente, que una partícula tenga una alta probabilidad de estar *aquí* mientras que la otra tiene una alta probabilidad de estar *allá*- las leyes de la mecánica cuántica aseguran que son indistinguibles, no sólo en la práctica sino también en principio. Son gemelos perfectos. Si alguien intercambiara las posiciones de las partículas (más precisamente, intercambiara las probabilidades de las dos partículas de estar situadas en una posición determinada), no habría absolutamente ninguna manera de saberlo.

Por lo tanto, si imaginamos que empezamos con una partícula ubicada aquí, [40] y de alguna manera ponemos otra partícula de la misma especie en exactamente el mismo estado cuántico (mismas probabilidades de orientación del espín, energía, etc.) en algún lugar distante, la partícula resultante sería indistinguible de la original y el proceso se llamaría con razón teletransportación cuántica. Por supuesto, si la partícula original sobreviviera intacta al proceso, podría estar tentado de llamar al proceso clonación cuántica o, quizás, fax cuántico. Pero como veremos, la realización científica de estas ideas no conserva la partícula original, que inevitablemente se modifica durante el proceso de teletransportación, por lo que no nos enfrentaremos a este dilema taxonómico.

Una preocupación más apremiante, y que los filósofos han considerado de cerca en varias formas, es si lo que es cierto para una partícula individual es cierto para una aglomeración. Si pudieras teletransportar de un lugar a otro cada una de las partículas que componen tu DeLorean, asegurando que el estado cuántico de cada una, incluyendo su relación con todas las demás, se reprodujera con un 100% de fidelidad, ¿habrías logrado teletransportar el vehículo? Aunque no tenemos pruebas empíricas que nos guíen, el caso teórico en apoyo de haber teletransportado el coche es fuerte. Las disposiciones atómicas y moleculares determinan cómo se ve y se siente un objeto, los sonidos y los olores, e incluso los sabores, por lo que el vehículo resultante debería ser idéntico al DeLorean original -baches, mellas, chirrido de la puerta del ala izquierda, olor a moho del perro de la familia, todo ello- y el coche debería dar un giro brusco y responder al pisar el acelerador exactamente como lo hizo el original. La cuestión de si el vehículo es realmente el original o, en su lugar, es un duplicado exacto, no es preocupante. Si le hubiera pedido a United Quantum Van Lines que enviara su coche en barco de Nueva York a Londres pero, sin que usted lo supiera, lo teletransportaron de la manera descrita, nunca podría saber la diferencia, ni siquiera en principio.

Pero, ¿y si la compañía de mudanzas hizo lo mismo con su gato, o, habiendo saciado su apetito por la gastronomía de los aviones, qué pasa si se decide por el teletransporte para su propio viaje transatlántico? ¿Sería el gato o la persona que sale de la cámara receptora el mismo que entró en el teletransportador?

Personalmente, creo que sí. De nuevo, como no tenemos datos relevantes, lo mejor que puedo hacer yo o cualquiera es especular. Pero a mi modo de ver, un ser vivo cuyos átomos y moléculas están en el mismo estado cuántico que los míos *soy* yo. Incluso si el "original" yo todavía existiera después de que se haya hecho la "copia", yo (nosotros) diría sin dudarlo que cada uno era yo. Seríamos de la misma mente -literalmente- al afirmar que ninguno de los dos tendría prioridad sobre el otro. Los pensamientos, recuerdos, emociones y juicios tienen una base física en las propiedades atómicas y moleculares del cuerpo humano; un estado cuántico idéntico de estos constituyentes elementales debería implicar un ser consciente idéntico. Con el paso del tiempo, nuestras experiencias nos harían diferenciarnos, pero creo sinceramente que de ahora en adelante habría dos de mí, no un original que fuera de alguna manera "realmente" yo y una copia que de alguna manera no lo fuera.

De hecho, estoy dispuesto a ser un poco más flojo. Nuestra composición física pasa por numerosas transformaciones todo el tiempo, algunas menores, otras drásticas, pero seguimos siendo la misma persona. Desde el Häagen-Dazs que inunda el torrente sanguíneo con grasa y azúcar, hasta la resonancia magnética que voltea los ejes de rotación de varios núcleos atómicos en el cerebro, hasta los transplantes de corazón y la liposucción, hasta el trillón de átomos en el cuerpo humano promedio que se reemplazan cada millonésima de segundo, sufrimos un cambio constante, pero nuestra identidad personal no se ve afectada. Así que, incluso si un ser teletransportado no coincidiera con mi estado físico con perfecta precisión, podría muy bien ser totalmente indistinguible de mí. En mi libro, podría muy bien *ser* yo.

Ciertamente, si usted cree que hay más en la vida, y la vida consciente en particular, que su composición física, sus normas para el éxito de la teletransportación serán más estrictas que las mías. Esta delicada cuestión, hasta qué punto nuestra identidad personal está ligada a nuestro ser físico, ha sido debatida durante años de diversas maneras sin que se haya respondido a satisfacción de todos. Mientras que yo creo que la identidad reside en lo físico, otros no están de acuerdo, y nadie puede afirmar tener la respuesta definitiva.

Pero independientemente de su punto de vista sobre la hipotética cuestión de la teletransportación de un ser vivo, los científicos han establecido ahora que, a través de las maravillas de la mecánica cuántica, *las partículas individuales pueden ser -y han sido- teletransportadas.*

Veamos cómo.

Enredo cuántico y teletransportación cuántica

En 1997, un grupo de físicos dirigido por Anton Zeilinger, entonces en la Universidad de Innsbruck, y otro grupo dirigido por A. Francesco De Martini en la Universidad de Roma, [2] llevaron a cabo cada uno la primera teletransportación exitosa de un solo fotón. En ambos experimentos, un fotón inicial en un estado cuántico determinado fue teletransportado a corta distancia a través de un laboratorio, pero hay razones para esperar que los procedimientos hubieran funcionado igualmente bien a cualquier distancia. Cada grupo utilizó una técnica basada en los conocimientos teóricos comunicados en 1993 por un equipo de físicos -Charles Bennett, del Centro de Investigaciones Watson de la IBM; Gilles Brassard, Claude Crepeau y Richard Josza, de la Universidad de Montreal; el físico israelí Asher Peres y William Wootters, del Williams College- que se basan en el entrelazamiento cuántico (Capítulo 4).

Recuerda, dos partículas enredadas, digamos dos fotones, tienen una extraña e íntima relación. Mientras que cada una tiene sólo una cierta probabilidad de girar de una manera u otra, y mientras que cada una, cuando se mide, parece "elegir" al azar entre las diversas posibilidades, cualquier "elección" que una hace a la otra también la hace inmediatamente, independientemente de su separación espacial. En el capítulo 4, explicamos que no hay manera de utilizar partículas enmarañadas para enviar un mensaje de un lugar a otro más rápido que la velocidad de la luz. Si se midiera una sucesión de fotones enredados en lugares muy separados, los datos recogidos en cualquiera de los dos detectores serían una secuencia aleatoria de resultados (siendo la frecuencia general de giro en una u otra dirección coherente con las ondas de probabilidad de las partículas). El enredo sólo se haría evidente al comparar las dos listas de resultados y al ver, de manera notable, que eran idénticas. Pero esa comparación requiere algún tipo de comunicación ordinaria, más lenta que la velocidad de la luz. Y como antes de la comparación no se podía detectar ningún rastro del enredo, no se podía enviar una señal más rápida que la de la velocidad de la luz.

Sin embargo, aunque el enredo no puede ser usado para la comunicación superlumínica, uno no puede dejar de sentir que las correlaciones a larga distancia entre las partículas son tan extrañas que tienen que ser útiles para algo extraordinario. En 1993, Bennett y sus colaboradores descubrieron una de esas posibilidades. Demostraron que el entrelazamiento cuántico podía ser usado para la teletransportación cuántica. Puede que no seas capaz de enviar un mensaje a una velocidad mayor que la de la luz, pero si te conformas con la teletransportación más lenta que la luz de una partícula de aquí a allá, el enredo es el billete.

El razonamiento detrás de esta conclusión, aunque matemáticamente directo, es astuto e ingenioso. Aquí está el sabor de cómo va.

Imagina que quiero teletransportar un fotón en particular, uno que llamaré fotón A, desde mi casa en Nueva York a mi amigo Nicholas en Londres. Para simplificar, veamos cómo teletransportaría el estado cuántico exacto del giro del fotón, es decir, cómo me aseguraría de que Nicholas adquiriera un fotón cuyas probabilidades de girar de una forma u otra fueran idénticas a las del Fotón A.

No puedo simplemente medir el spin del Fotón A, llamar a Nicholas, y hacer que manipule un fotón en su extremo para que su spin coincida con mi observación; el resultado que encuentre se vería afectado por la observación que haga, y por lo tanto no reflejaría el verdadero estado del Fotón A antes de que yo mirara. Entonces, ¿qué puedo hacer? Bueno, según Bennett y sus colegas, el primer paso es asegurarse de que Nicholas y yo tengamos cada uno uno de dos fotones adicionales, llamémoslos fotones B y C, que están enredados. La forma de obtener estos fotones no es particularmente importante. Supongamos que Nicholas y yo estamos seguros de que aunque estamos en lados opuestos del Atlántico, si yo midiera el giro del Fotón B sobre cualquier eje dado, y él hiciera lo mismo para el Fotón C, encontraríamos exactamente el mismo resultado.

El siguiente paso, según Bennett y sus compañeros de trabajo, es *no* medir directamente el Fotón A -el fotón que espero teletransportar- ya que resulta ser una intervención demasiado drástica. En su lugar, debería medir una característica conjunta del Fotón A y del Fotón B enredado. Por ejemplo, la teoría cuántica me permite medir si los Fotones A y B tienen el mismo giro sobre un eje vertical, sin medir sus giros individualmente. Del mismo modo, la teoría cuántica me permite medir si los fotones A y B tienen el mismo spin sobre un eje horizontal, sin medir sus giros individualmente. Con esta medición conjunta, no aprendo el spin del fotón A, pero sí aprendo cómo el spin del fotón A está relacionado con el del fotón B. Y esa es una información importante.

El Fotón C distante está enredado con el Fotón B, por lo que si sé cómo se relaciona el Fotón A con el B, puedo deducir cómo se relaciona el Fotón A con el C. Si ahora le comunico esta información a Nicholas, comunicándole cómo el Fotón A está girando en relación con su Fotón C, él puede determinar cómo debe manipularse el Fotón C para que su estado cuántico coincida con el del Fotón A. Una vez que realice la manipulación necesaria, el estado cuántico del fotón que posee será idéntico al del Fotón A, y eso es todo lo que necesitamos para declarar que el Fotón A ha sido teletransportado con éxito. En el caso más simple, por ejemplo, si mi medición revelara que el spin del Fotón B es idéntico al del Fotón A, concluiríamos que el spin del Fotón C es también idéntico al del Fotón A, y sin más preámbulos, la teletransportación sería completa. El fotón C estaría en el mismo estado cuántico que el fotón A, como se desea.

Bueno, casi. Esa es la idea, pero para explicar la teletransportación cuántica en pasos manejables, he dejado fuera un elemento absolutamente crucial de la historia, uno que ahora completaré. Cuando realizo la medición conjunta de los fotones A y B, de hecho aprendo cómo el espín del fotón A está relacionado con el del fotón B. Pero, como en todas las observaciones, la medición en sí misma afecta a los fotones. Por lo tanto, *no aprendo cómo el spin del Fotón A estaba relacionado con el del Fotón* B antes de la medición. En cambio, aprendo cómo se relacionan después de que ambos han sido interrumpidos por el acto de la medición. Así que, a primera vista, parece que nos enfrentamos al mismo obstáculo cuántico para replicar el fotón A que describí al principio: la inevitable interrupción causada por el proceso de medición. Ahí es donde el Fotón C viene al rescate. Debido a que los fotones B y C están enredados, la interrupción que causo al fotón B en Nueva York también se reflejará en el estado del fotón C en Londres. Esa es la maravillosa naturaleza del entrelazamiento cuántico, como se explica en el capítulo 4. De hecho, Bennett y sus colaboradores mostraron matemáticamente que a través de su entrelazamiento con el Fotón B, la perturbación causada por mi medición se imprime en el distante Fotón C.

Y eso es fantásticamente interesante. A través de mi medición, somos capaces de aprender cómo el giro del fotón A está relacionado con el del fotón B, pero con el espinoso problema de que ambos fotones fueron interrumpidos por mi intromisión. A través de la intromisión, sin embargo, el Fotón C está ligado a mi medición -aunque está a miles de kilómetros de distancia- y esto nos permite aislar el efecto de la interrupción y por lo tanto tener acceso a la información que normalmente se pierde en el proceso de medición. Si ahora llamo a Nicholas con el resultado de mi medición, él aprenderá cómo se relacionan los giros de los fotones A y B después de la interrupción, y, a través del fotón C, tendrá acceso al impacto de la propia interrupción. Esto permite a Nicholas utilizar el fotón C para, en términos generales, restar la interrupción causada por mi medición y así evitar el obstáculo de duplicar el fotón A. De hecho, como muestran detalladamente Bennett y sus colaboradores, como mucho mediante una simple manipulación del giro del fotón C (basada en mi llamada telefónica que le informa de cómo el fotón A está girando en relación con el fotón B) Nicholas se asegurará de que el fotón C, en lo que respecta a su giro, replique exactamente el estado cuántico del fotón A *antes de mi medición.* Además, aunque el spin es sólo una característica de un fotón, otras características del estado cuántico del Fotón A (como la probabilidad de que tenga una energía u otra) pueden replicarse de forma similar. Así, utilizando este procedimiento, podríamos teletransportar el fotón A de Nueva York a Londres. [3]

Como pueden ver, la teletransportación cuántica implica dos etapas, cada una de las cuales transmite información crítica y complementaria. Primero, realizamos una medición conjunta del fotón que queremos teletransportar con un miembro de un par de fotones enredados. La perturbación asociada a la medición se imprime en la pareja distante del par enredado a través de la rareza de la no localidad cuántica. Esa es la Etapa 1, la parte claramente cuántica del proceso de

teletransportación. En la Etapa 2, el resultado de la medición en sí se comunica al lugar de recepción distante por medios más estándar (teléfono, fax, correo electrónico...) en lo que podría llamarse la parte clásica del proceso de teletransportación. En combinación, la Etapa 1 y la Etapa 2 permiten que el estado cuántico exacto del fotón que queremos teletransportar se reproduzca mediante una operación sencilla (como una rotación en cierta medida sobre determinados ejes) en el miembro distante del par enmarañado.

Fíjense también en un par de características clave de la teletransportación cuántica. Desde que el estado cuántico original del Fotón A fue interrumpido por mi medición, el Fotón C en Londres es ahora el único en ese estado original. No hay dos copias del Fotón A original y así, en lugar de llamar a esto fax cuántico, es de hecho más exacto llamar a esto teletransportación cuántica. [4] Además, aunque teletransportamos el Fotón A de Nueva York a Londres -aunque el fotón de Londres se vuelve indistinguible del fotón original que teníamos en Nueva York- no aprendemos el estado cuántico del Fotón A. El fotón de Londres tiene exactamente la misma probabilidad de girar en una u otra dirección que el fotón A antes de mi intromisión, pero no sabemos cuál es esa probabilidad. De hecho, ese es el truco que subyace a la teletransportación cuántica. La interrupción causada por la medición nos impide determinar el estado cuántico del Fotón A, pero en el enfoque descrito, *no necesitamos saber el estado cuántico del fotón para teletransportarlo.* Necesitamos conocer sólo un aspecto de su estado cuántico, lo que aprendemos de la medición conjunta con el fotón B. El entrelazamiento cuántico con el Fotón C distante rellena el resto.

La aplicación de esta estrategia de teletransportación cuántica no fue una hazaña pequeña. A principios de los años noventa, la creación de un par de fotones enmarañados era un procedimiento estándar, pero nunca se había logrado realizar una medición conjunta de dos fotones (la medición conjunta de los fotones A y B descrita anteriormente, técnicamente llamada *medición del estado de Bell*). El logro de ambos grupos, el de Zeilinger y el de De Martini, fue inventar ingeniosas técnicas experimentales para la medición conjunta y realizarlas en el laboratorio. [5] Para 1997 habían logrado este objetivo, convirtiéndose en los primeros grupos en lograr la teletransportación de una sola partícula.

Teletransportación realista

Dado que usted y yo y un DeLorean y todo lo demás están compuestos de muchas partículas, el siguiente paso natural es imaginar la aplicación de la teletransportación cuántica a colecciones tan grandes de partículas, permitiéndonos "transportar" objetos macroscópicos de un lugar a otro. Pero el salto de teletransportar una sola partícula a teletransportar una colección macroscópica de partículas es asombroso, y está enormemente lejos de lo que los

investigadores pueden lograr ahora y de lo que muchos líderes en este campo se imaginan lograr incluso en un futuro lejano. Pero por diversión, aquí está cómo Zeilinger sueña con que algún día podamos hacerlo.

Imagina que quiero teletransportar mi DeLorean de Nueva York a Londres. En lugar de proporcionarnos a Nicholas y a mí un miembro cada uno de un par de fotones enredados (lo que necesitábamos para teletransportar un solo fotón), debemos tener cada uno una cámara de partículas que contenga suficientes protones, neutrones, electrones, etc. para construir un DeLorean, con todas las partículas de mi cámara enlazadas cuánticamente con todas las de la cámara de Nicholas (ver Figura 15.1). También necesito un dispositivo que mida las propiedades conjuntas de todas las partículas que componen mi DeLorean con esas partículas revoloteando de un lado a otro dentro de mi cámara (el análogo de la medición de las características conjuntas de los fotones A y B). A través del entrelazamiento de las partículas en las dos cámaras, el impacto de las mediciones conjuntas que llevo a cabo en Nueva York se imprimirá en la cámara de partículas de Nicholas en Londres (el análogo del estado del Fotón C que refleja la medición conjunta de A y B). Si llamo a Nicholas y le comunico los resultados de mis mediciones (será una llamada costosa, ya que le daré a Nicholas unos 10^{30} resultados), los datos le instruirán sobre cómo manipular las partículas de su cámara (de la misma manera que mi anterior llamada telefónica le instruyó sobre cómo manipular el Fotón C). Cuando termine, cada partícula de su cámara estará en el mismo estado cuántico que cada partícula del DeLorean (antes de que fuera sometida a cualquier medición) y así, como en nuestra discusión anterior, Nicholas tendrá ahora el DeLorean. [41] Su teletransportación de Nueva York a Londres estará completa.



Figura 15.1 Un enfoque imaginativo del teletransporte prevé tener dos cámaras de partículas cuánticas enmarañadas en lugares distantes, y un medio de llevar a cabo mediciones conjuntas apropiadas de las partículas que componen el objeto que se va a teletransportar con las partículas de una de las cámaras. Los resultados de estas mediciones proporcionarían entonces la información necesaria para manipular las partículas de la segunda cámara para replicar el objeto y completar la teletransportación.

Sin embargo, tened en cuenta que, a día de hoy, cada paso en esta versión macroscópica de la teletransportación cuántica es una fantasía. Un objeto como un DeLorean tiene más de un billón de billones de partículas. Mientras que los

experimentadores están ganando facilidad para enredar más de un solo par de partículas, están extremadamente lejos de alcanzar los números relevantes para las entidades macroscópicas. [6] La configuración de las dos cámaras de partículas enredadas está por lo tanto absurdamente más allá del alcance actual. Además, la medición conjunta de *dos* fotones fue, en sí misma, una hazaña difícil e impresionante. Extender esto a una medición conjunta de miles de millones y miles de millones de partículas es, a día de hoy, inimaginable. Desde nuestro punto de vista actual, una evaluación desapasionada concluiría que teletransportar un objeto macroscópico, al menos de la forma en que se ha empleado hasta ahora para una sola partícula, está a eones, si no a una eternidad de distancia.

Pero, como la única constante en la ciencia y la tecnología es la trascendencia de las profecías negativas, simplemente señalaré lo obvio: la teletransportación de cuerpos macroscópicos parece improbable. Sin embargo, ¿quién sabe? Hace 40 años, el ordenador del Enterprise también parecía poco probable.[7]

Los rompecabezas del viaje en el tiempo

No se puede negar que la vida sería diferente si teletransportar objetos macroscópicos fuera tan fácil como llamar a FedEx o subir a un metro. Viajes impracticables o imposibles estarían disponibles, y el concepto de viaje a través del espacio se revolucionaría hasta ese raro grado en que un salto en la conveniencia y practicidad marca un cambio fundamental en la visión del mundo.

Aún así, el impacto de la teletransportación en nuestro sentido del universo palidecería en comparación con la agitación provocada por el logro de un viaje volitivo a través del tiempo. Todo el mundo sabe que con suficiente esfuerzo y dedicación podemos, al menos en principio, ir de aquí a allá. Aunque hay limitaciones tecnológicas en nuestros viajes a través del espacio, dentro de esas limitaciones nuestros viajes están guiados por la elección y el capricho. Pero para llegar de ahora en adelante... Nuestras experiencias atestiguan abrumadoramente que hay como mucho una ruta: debemos esperar un segundo, debemos seguir un segundo, ya que el tic-tac ahora da metódicamente paso al entonces. Y esto supone que "entonces" es más tarde que "ahora". Si el entonces precede al ahora, la experiencia dicta que no hay ninguna ruta; viajar al pasado parece no ser una opción. A diferencia de los viajes a través del espacio, los viajes a través del tiempo parecen ser todo menos una cuestión de elección y capricho. Cuando se trata del tiempo, somos arrastrados en una dirección, nos guste o no.

Si fuéramos capaces de navegar en el tiempo tan fácilmente como navegamos en el espacio, nuestra visión del mundo no sólo cambiaría, sino que sufriría el cambio más dramático en la historia de nuestra especie. A la luz de tan innegable impacto, a menudo me sorprende cuán poca gente se da cuenta de que los fundamentos

teóricos de un tipo de viaje en el tiempo hacia el futuro- han estado vigentes desde principios del siglo pasado.

Cuando Einstein descubrió la naturaleza del espacio tiempo relativista especial, estableció un plan para avanzar rápidamente hacia el futuro. Si quieres ver lo que está ocurriendo en el planeta Tierra 1.000, o 10.000, o 10 millones de años en el futuro, las leyes de la física de Einstein te dicen cómo hacerlo. Construyes un vehículo cuya velocidad puede alcanzar, digamos, el 99,9999999996 por ciento de la velocidad de la luz. A toda velocidad, te diriges al espacio profundo durante un día, o diez días, o un poco más de veintisiete años según el reloj de tu nave, y luego das la vuelta bruscamente y vuelves a la Tierra, de nuevo a toda velocidad. A su regreso, 1.000, o 10.000, o 10 millones de años de tiempo terrestre *habrán transcurrido*. Esta es una predicción indiscutible y verificada experimentalmente de la relatividad especial; es un ejemplo de la ralentización del tiempo con el aumento de la velocidad descrito en el capítulo 3. [8] Por supuesto, dado que los vehículos de tal velocidad están más allá de lo que podemos construir, nadie ha probado estas predicciones literalmente. Pero como discutimos anteriormente, los investigadores han confirmado la disminución de tiempo predicha para un avión comercial, que viaja a una pequeña fracción de la velocidad de la luz, así como la de partículas elementales como los muones que corren a través de aceleradores a una velocidad muy cercana a la de la luz (los muones estacionarios decaen en otras partículas en aproximadamente dos millonésimas de segundo, pero cuanto más rápido viajan, más lento es el tictac de su reloj interno, y por lo tanto, más tiempo parecen vivir los muones). Hay muchas razones para creer, y ninguna razón para no creer, que la relatividad especial es correcta, y su estrategia para alcanzar el futuro funcionaría como se predijo. La tecnología, no la física, nos mantiene a cada uno de nosotros atados a esta época. [42]

Sin embargo, cuando pensamos en el otro tipo de viaje en el tiempo, el viaje al pasado, surgen problemas más espinosos. Sin duda, usted está familiarizado con algunos de estos. Por ejemplo, está el escenario estándar en el que viajas al pasado y evitas tu propio nacimiento. En muchas descripciones ficticias esto se logra con violencia; sin embargo, cualquier intervención menos drástica pero igualmente efectiva, como evitar que tus padres se conozcan, sería igual de efectiva. La paradoja es clara: si nunca naciste, ¿cómo llegaste a ser y, en particular, cómo viajaste al pasado e impediste que tus padres se conocieran? Para viajar al pasado y mantener a tus padres separados, tenías que haber nacido; pero si hubieras nacido, viajado al pasado y mantenido a tus padres separados, *no* habrías nacido. Nos encontramos de cabeza en un callejón sin salida lógico.

Una paradoja similar, sugerida por el filósofo de Oxford Michael Dummett y resaltada por su colega David Deutsch, provoca en el cerebro una forma ligeramente diferente, tal vez incluso más desconcertante. Aquí hay una versión. Imagina que construyo una máquina del tiempo y viajo diez años hacia el futuro.

Después de un rápido almuerzo en Tofu-4-U (la cadena que superó a McDonald's después de que la gran pandemia de las vacas locas hiciera mella en el entusiasmo del público por las hamburguesas con queso), encuentro el cibercafé más cercano y me conecto a Internet para ver qué avances se han hecho en la teoría de las cuerdas. Y me llevo una espléndida sorpresa. Leí que todos los temas abiertos en la teoría de cuerdas han sido resueltos. La teoría ha sido completamente elaborada y utilizada con éxito para explicar todas las propiedades de las partículas conocidas. Se ha encontrado evidencia incontrovertible de las dimensiones adicionales, y las predicciones de la teoría de las partículas supersimétricas asociadas -sus masas, cargas eléctricas, etc.- acaban de ser confirmadas, de inmediato, por el Gran Colisionador de Hadrones. Ya no hay ninguna duda: la teoría de cuerdas es la teoría unificada del universo.

Cuando cavo un poco más profundo para ver quién es responsable de estos grandes avances, me llevo una sorpresa aún mayor. El trabajo de avance fue escrito un año antes por nada menos que Rita Greene. Mi madre. Estoy sorprendida. Sin ánimo de ofender: mi madre es una persona maravillosa, pero no es científica, no puede entender por qué alguien sería científico, y, por ejemplo, leyó sólo unas pocas páginas de *El Universo Elegante* antes de dejarla, diciendo que le daba dolor de cabeza. Entonces, ¿cómo es posible que haya escrito *el* artículo clave de la teoría de cuerdas? Bueno, leí su trabajo en línea, estoy sorprendido por el simple pero profundo razonamiento, y veo al final que *me ha agradecido* por años de intensa instrucción en matemáticas y física después de que un seminario de Tony Robbins la persuadió para superar sus miedos y perseguir su físico interior. Vaya, creo. Se acababa de inscribir en ese seminario cuando me embarqué en mi viaje al futuro. Será mejor que regrese a mi propio tiempo para comenzar la instrucción.

Bueno, vuelvo atrás en el tiempo y empiezo a enseñar a mi madre la teoría de las cuerdas. Pero no va bien. Pasa un año. Luego dos. Y aunque se esfuerza, no lo consigue. Empiezo a preocuparme. Nos quedamos en ello un par de años más, pero el progreso es mínimo. Ahora estoy realmente preocupada. No queda mucho tiempo antes de que aparezca su periódico. ¿Cómo va a escribirlo? Finalmente, tomo la gran decisión. Cuando leí su trabajo en el futuro, me impresionó tanto que lo recuerdo tan claro como el día. Y así, en lugar de hacer que lo descubra por sí misma -algo que cada vez parece menos probable- le digo lo que tiene que escribir, asegurándome de que lo incluya todo exactamente como lo recuerdo al leerlo. Ella libera el papel, y en corto plazo enciende el mundo de la física. Todo lo que leí durante mi tiempo en el futuro se cumple.

Ahora, aquí está la cuestión desconcertante. ¿Quién debería recibir el crédito por el innovador trabajo de mi madre? Ciertamente no debería. Me enteré de los resultados leyéndolos en su periódico. Pero ¿cómo puede mi madre tomar el crédito, cuando escribió sólo lo que yo le dije? Por supuesto, la cuestión aquí no es realmente una cuestión de crédito, es la cuestión de dónde vinieron los nuevos

conocimientos, las nuevas ideas y la nueva comprensión presentada en el trabajo de mi madre. ¿A qué puedo apuntar y decir, "Esta persona o esta computadora llegaron a los nuevos resultados"? Yo no tenía los conocimientos, ni mi madre, no había nadie más involucrado, y no usábamos una computadora. Sin embargo, de alguna manera estos brillantes resultados están todos en su papel. Aparentemente, en un mundo que permite viajar en el tiempo tanto al futuro como al pasado, el conocimiento puede materializarse de la nada. Aunque no es tan paradójico como prevenir tu propio nacimiento, esto es positivamente extraño.

¿Qué deberíamos hacer con tal paradoja y rareza? ¿Deberíamos concluir que mientras que el viaje en el tiempo hacia el futuro está permitido por las leyes de la física, cualquier intento de volver al pasado debe fracasar? Algunos ciertamente han pensado así. Pero, como veremos ahora, hay maneras de evitar los problemas difíciles que hemos encontrado. Esto no significa que el viaje al pasado sea posible, es un tema aparte que consideraremos en breve, pero muestra que el viaje al pasado no puede ser descartado simplemente invocando los rompecabezas que acabamos de discutir.

Repensando los rompecabezas

Recordemos que en el capítulo 5 discutimos el flujo del tiempo, desde la perspectiva de la física clásica, y nos encontramos con una imagen que difiere sustancialmente de nuestra imagen intuitiva. El pensamiento cuidadoso nos llevó a imaginar el espacio tiempo como un bloque de hielo con cada momento congelado para siempre en su lugar, en oposición a la imagen familiar del tiempo como un río que nos arrastra de un momento a otro. Estos momentos congelados se agrupan en "*ahora",* en eventos que suceden al mismo tiempo, de diferentes maneras, por observadores en diferentes estados de movimiento. Y para acomodar esta flexibilidad de cortar el bloque espacio-tiempo en diferentes nociones de ahora, también invocamos una metáfora equivalente en la que el espacio-tiempo es visto como una barra de pan que puede ser cortada en diferentes ángulos.

Pero independientemente de la metáfora, la lección del capítulo 5 es que los momentos, los eventos que conforman el pan de cada espacio, simplemente son. Son intemporales. Cada momento, cada evento o suceso, existe, así como cada punto en el espacio existe. Los momentos no cobran vida momentáneamente cuando son iluminados por el "foco" del presente de un observador; esa imagen se alinea bien con nuestra intuición pero no resiste el análisis lógico. En cambio, una vez iluminada, siempre está iluminada. Los momentos no cambian. Los momentos sí. Estar iluminado es simplemente una de las muchas características inalterables que constituyen un momento. Esto es particularmente evidente desde la perspicaz aunque imaginaria perspectiva de la figura 5.1, en la que todos los eventos que conforman la historia del universo están a la vista; todos están ahí, estáticos e

inalterables. Los diferentes observadores no se ponen de acuerdo sobre cuáles de los acontecimientos suceden al mismo tiempo - ellos cortan el pan del espacio tiempo en diferentes ángulos - pero el pan total y sus acontecimientos constituyentes son universales, literalmente.

La mecánica cuántica ofrece ciertas modificaciones a esta perspectiva clásica del tiempo. Por ejemplo, vimos en el capítulo 12 que en escalas extremadamente cortas, el espacio y el espacio tiempo se vuelven inevitablemente ondulados y con baches. Pero (Capítulo 7), una evaluación completa de la mecánica cuántica y del tiempo requiere una resolución del problema de la medición cuántica. Una de las propuestas para hacerlo, la interpretación de Muchos Mundos, es particularmente relevante para hacer frente a las paradojas que surgen de los viajes en el tiempo, y nos ocuparemos de ello en la próxima sección. Pero en esta sección, mantengámonos clásicos y traigamos la representación del bloque de hielo/hoja de pan del espacio-tiempo para que se ocupe de estos rompecabezas.

Tomemos el paradójico ejemplo de que has retrocedido en el tiempo y has impedido que tus padres se conozcan. Intuitivamente, todos sabemos lo que se supone que eso significa. Antes de que viajaras en el tiempo al pasado, tus padres se conocieron -digamos, a medianoche, el 31 de diciembre de 1965, [43] en una fiesta de Año Nuevo- y, a su debido tiempo, tu madre te dio a luz. Luego, muchos años más tarde, decidiste viajar al pasado -volviendo al 31 de diciembre de 1965- y una vez allí, cambiaste las cosas; en particular, mantuviste a tus padres separados, impidiendo tu propia concepción y nacimiento. Pero ahora contrarrestemos esta descripción intuitiva con la descripción del tiempo, más completamente razonada, del espacio y el tiempo.

En el fondo, la descripción intuitiva no tiene sentido porque asume que los momentos pueden cambiar. La imagen intuitiva prevé el golpe de medianoche del 31 de diciembre de 1965 (usando el corte de tiempo terrestre estándar), como "inicialmente" el momento en que tus padres se reúnen, pero prevé además que tu interferencia "posteriormente" cambia las cosas de modo que al golpe de medianoche del 31 de diciembre de 1965, tus padres están separados por millas, si no por continentes. El problema con este recuento de eventos, sin embargo, es que los momentos no cambian; como hemos visto, simplemente lo hacen. El pan de espacio-tiempo existe, fijo e inmutable. No tiene sentido que un momento "inicialmente" sea de una manera y "posteriormente" sea de otra.

Si viajaste en el tiempo hasta el 31 de diciembre de 1965, entonces estuviste ahí, siempre estuviste ahí, siempre estarás ahí, nunca no estuviste ahí. El 31 de diciembre de 1965, no ocurrió dos veces, y te perdiste el debut pero asististe al bis. Desde la perspectiva atemporal de la figura 5.1, existes -estático e inalterable- en varios lugares del pan de espacio-tiempo. Si hoy usted ajusta los diales de su máquina del tiempo para que le envíen a las 11:50 p.m. del 31 de diciembre de 1965, entonces este último momento estará entre las ubicaciones del pan de

espacio-tiempo en las que se le puede encontrar. Pero tu presencia en la víspera de Año Nuevo de 1965, será una característica *eterna* e *inmutable* del espacio tiempo.

Esta toma de conciencia todavía nos lleva a algunas conclusiones extrañas, pero evita la paradoja. Por ejemplo, usted aparecería en el pan del espacio tiempo a las 11:50 p.m., el 31 de diciembre de 1965, pero antes de ese momento no habría ningún registro de su existencia. Esto es extraño, pero no paradójico. Si un tipo te viera aparecer a las 11:50 p.m. y te preguntara, con miedo en sus ojos, de dónde vienes, podrías responder tranquilamente: "El futuro". En este escenario, al menos hasta ahora, no estamos atrapados en un impasse lógico. Donde las cosas se ponen más interesantes, por supuesto, es si luego tratas de llevar a cabo tu misión y evitar que tus padres se conozcan. ¿Qué es lo que sucede? Bueno, manteniendo cuidadosamente la perspectiva del "bloque espacio-tiempo", ineludiblemente concluimos que no puedes tener éxito. No importa lo que hagas en esa fatídica víspera de Año Nuevo, fracasarás. Mantener a tus padres alejados, aunque parezca estar dentro del ámbito de las cosas que puedes hacer, en realidad equivale a un galimatías lógico. Tus padres se conocieron al filo de la medianoche. Tú estabas allí. Y "siempre" estarás ahí. Cada momento es así; no cambia. Aplicar el concepto de cambio a un momento tiene tanto sentido como someter una roca al psicoanálisis. Tus padres se conocieron al filo de la medianoche del 31 de diciembre de 1965, y *nada* puede cambiar eso porque su encuentro es un acontecimiento inmutable, inalterable, que ocupa eternamente su lugar en el espacio tiempo.

De hecho, ahora que lo piensas, recuerdas que en algún momento de tu adolescencia, cuando le preguntaste a tu padre cómo era proponerse a tu madre, te dijo que no había planeado proponérselo en absoluto. Apenas había conocido a tu madre antes de hacer la gran pregunta. Pero diez minutos antes de la medianoche en una fiesta de Año Nuevo, se asustó tanto al ver a un hombre que venía de ninguna parte, un hombre que decía ser del futuro, que cuando conoció a tu madre decidió proponérselo en el acto.

El punto es que el conjunto completo e invariable de eventos en el espacio tiempo necesariamente encaja en un todo coherente y autoconsistente. El universo tiene sentido. Si viajas en el tiempo hasta el 31 de diciembre de 1965, estás cumpliendo tu propio destino. En el pan del espacio tiempo, hay alguien presente a las 11:50 p.m. del 31 de diciembre de 1965, que no está allí en ningún momento anterior. Desde la perspectiva imaginaria y externa de la figura 5.1, podríamos ver esto directamente; también veríamos, innegablemente, que la persona es *usted* a su edad actual. Para que estos acontecimientos, situados hace décadas, tengan sentido, *hay que viajar en el* tiempo hasta 1965. Es más, desde nuestra perspectiva exterior podemos ver a tu padre haciéndote una pregunta justo después de las 11:50 p.m. del 31 de diciembre de 1965, mirando asustado, corriendo y encontrándose con tu madre a medianoche; un poco más lejos a lo

largo del pan, podemos ver la boda de tus padres, tu nacimiento, tu posterior infancia y, más tarde, tu entrada en la máquina del tiempo. Si el viaje en el tiempo al pasado fuera posible, ya no podríamos explicar los acontecimientos de una época únicamente en términos de los acontecimientos de épocas anteriores (desde cualquier perspectiva); pero la totalidad de los acontecimientos constituiría necesariamente una historia sensata, coherente y no contradictoria.

Como se enfatizó en la última sección, esto no significa, ni mucho menos, que el viaje en el tiempo al pasado sea posible. Pero sí sugiere firmemente que las supuestas paradojas, como la de impedir el propio nacimiento, nacen en sí mismas de defectos lógicos. Si viajas en el tiempo al pasado, no puedes cambiarlo más de lo que puedes cambiar el valor de pi. Si viajas al pasado, eres, serás y siempre fuiste parte del pasado, el mismo pasado que te lleva a viajar al mismo.

Desde la perspectiva exterior de la figura 5.1, esta explicación es a la vez estrecha y coherente. Al estudiar la totalidad de los eventos en el pan de espacio tiempo, vemos que se entrelazan con la rígida economía de un crucigrama cósmico. Sin embargo, desde su perspectiva el 31 de diciembre de 1965, las cosas siguen siendo desconcertantes. Declaré más arriba que aunque estés decidido a evitar que tus padres se conozcan, no puedes tener éxito en el enfoque clásico de este problema. Puedes verlos reunirse. Incluso puedes facilitar su encuentro, quizás sin querer, como en la historia que he contado. Pueden viajar en el tiempo repetidamente, así que hay muchos de ustedes presentes, cada uno con la intención de evitar la unión de sus padres. Pero tener éxito en impedir que sus padres se reúnan sería cambiar algo con respecto a lo que el concepto de cambio no tiene sentido.

Pero, incluso con la perspicacia de estas observaciones abstractas, no podemos dejar de preguntar: ¿Qué le impide tener éxito? Si estás en la fiesta a las 11:50 p.m. y ves a tu joven madre, ¿qué te impide alejarla? O, si ves a tu joven padre, ¿qué te impide, qué diablos, digamos, dispararle? ¿No tienes libre albedrío? Aquí es donde, algún sospechoso, la mecánica cuántica puede entrar en la historia.

Libre albedrío, muchos mundos y viajes en el tiempo

El libre albedrío es un tema delicado, incluso sin el complicado factor del viaje en el tiempo. Las leyes de la física clásica son deterministas. Como vimos anteriormente, si conocieras con precisión cómo son las cosas ahora (la posición y la velocidad de cada partícula en el universo), las leyes de la física clásica te dirían exactamente cómo eran o serían las cosas en cualquier otro momento que especificaras. Las ecuaciones son indiferentes a la supuesta libertad de la voluntad humana. Algunos han interpretado esto como que en un universo clásico, el libre albedrío sería una ilusión. Estás hecho de una colección de partículas, así que si las leyes de la física clásica pudieran determinar todo acerca de tus

partículas en cualquier momento, dónde estarían, cómo se moverían y así sucesivamente, tu habilidad voluntaria para determinar tus propias acciones parecería totalmente comprometida. Este razonamiento me convence, pero aquellos que creen que somos más que la suma de nuestras partículas pueden estar en desacuerdo.

De todos modos, la relevancia de estas observaciones es limitada, ya que el nuestro es un universo cuántico, no clásico. En la física cuántica, la física del mundo real, hay semejanzas con esta perspectiva clásica; también hay diferencias potencialmente fundamentales. Como leíste en el capítulo 7, si conoces la función de onda cuántica ahora mismo para cada partícula del universo, la ecuación de Schrödinger te dice cómo fue o será la función de onda en cualquier otro momento que especifiques. Este componente de la física cuántica es totalmente determinista, al igual que en la física clásica. Sin embargo, el acto de observación complica la historia de la mecánica cuántica y, como hemos visto, todavía hay un acalorado debate sobre el problema de la medición cuántica. Si los físicos concluyen algún día que la ecuación de Schrödinger es todo lo que hay en la mecánica cuántica, entonces la física cuántica, en su totalidad, sería tan determinista como la física clásica. Como en el determinismo clásico, algunos dirían que esto significa que el libre albedrío es una ilusión; otros no. Pero si actualmente nos falta una parte de la historia cuántica -si el paso de las probabilidades a los resultados definitivos requiere algo más allá del marco cuántico estándar- es al menos posible que el libre albedrío pueda encontrar una realización concreta dentro de la ley física. Podríamos encontrar algún día, como han especulado algunos físicos, que el acto de observación consciente es un elemento integral de la mecánica cuántica, siendo el catalizador que induce un resultado de la neblina cuántica a realizarse.[9] Personalmente, encuentro esto extremadamente improbable, pero no conozco ninguna manera de descartarlo.

El resultado es que la condición de libre albedrío y su papel dentro de la ley física fundamental siguen sin resolverse. Así que consideremos ambas posibilidades, el libre albedrío que es ilusorio y el libre albedrío que es real.

Si el libre albedrío es una ilusión, y si el viaje en el tiempo al pasado es posible, entonces su incapacidad para evitar que sus padres se conozcan no plantea ningún rompecabezas. Aunque sientes que tienes el control de tus acciones, las leyes de la física están realmente moviendo los hilos. Cuando vas a alejar a tu madre o disparar a tu padre, las leyes de la física se interponen en el camino. La máquina del tiempo te lleva al lado equivocado de la ciudad, y llegas después de que tus padres se hayan conocido; o intentas apretar el gatillo y el arma se atasca; o apretas el gatillo, pero fallas el blanco y en su lugar eliminas al único competidor de tu padre por la mano de tu madre, despejando el camino para su unión; o, quizás, cuando sales de la máquina del tiempo ya no tienes el deseo de impedir que tus padres se conozcan. Independientemente de tu intención cuando entras en la máquina del tiempo, tus acciones cuando sales son parte de la historia

consistente del espacio tiempo. Las leyes de la física triunfan sobre todos los intentos de frustrar la lógica. Todo lo que haces encaja perfectamente. Siempre lo ha hecho y siempre lo hará. No puedes cambiar lo inmutable.

Si el libre albedrío no es una ilusión, y si el viaje en el tiempo al pasado es posible, la física cuántica ofrece sugerencias alternativas para lo que podría suceder, y es claramente diferente de la formulación basada en la física clásica. Una propuesta particularmente convincente, defendida por Deutsch, hace uso de la interpretación de la mecánica cuántica de Muchos Mundos. Recuerde del capítulo 7 que en el marco de Muchos Mundos, cada resultado potencial encarnado en una función de onda cuántica -una partícula que gira de esta manera o de aquella, otra partícula que está aquí o allí- se realiza en su propio universo separado y paralelo. El universo del que somos conscientes en un momento dado no es más que uno de un número infinito en el que cada evolución posible permitida por la física cuántica se realiza por separado. En este marco, es tentador sugerir que la libertad que sentimos para hacer esta o aquella elección refleja la posibilidad que tenemos de entrar en este o aquel universo paralelo en un momento posterior. Por supuesto, dado que infinitas copias de usted y de mí están esparcidas por los universos paralelos, los conceptos de identidad personal y de libre albedrío deben ser interpretados en este contexto ampliado.

En cuanto a los viajes en el tiempo y las potenciales paradojas, la interpretación de Muchos Mundos sugiere una resolución novedosa. Cuando viajas a las 11:50 p.m. del 31 de diciembre de 1965, sacas tu arma, apuntas a tu padre y aprietas el gatillo, el arma funciona y le das al objetivo deseado. Pero como esto no es lo que ocurrió en el universo desde el que te embarcaste en tu odisea de viaje en el tiempo, tu viaje no sólo debe haber sido a través del tiempo, sino que también debe *haber sido de un universo paralelo a otro.* El universo paralelo en el que te encuentras ahora es uno en el que tus padres nunca se conocieron, un universo que la interpretación de Muchos Mundos nos asegura que está ahí fuera (ya que todos los universos posibles consistentes con las leyes de la física cuántica están ahí fuera). Y así, en este enfoque, no nos enfrentamos a ninguna paradoja lógica, porque hay varias versiones de un momento dado, cada una situada en un universo paralelo diferente; en las interpretaciones de Muchos Mundos, es como si hubiera infinitamente muchos panes de espacio-tiempo, no sólo uno. En el universo de origen, tus padres se conocieron el 31 de diciembre de 1965, naciste, creciste, le guardaste rencor a tu padre, te fascinó el viaje en el tiempo y te embarcaste en un viaje al 31 de diciembre de 1965. En el universo al que llegas, tu padre es asesinado el 31 de diciembre de 1965, antes de conocer a tu madre, por un pistolero que dice ser su hijo del futuro. Una versión de ti nunca nace en este universo, pero está bien, ya que el tú que apretó el gatillo tiene padres. Es sólo que ellos viven en un universo paralelo diferente. Si alguien en este universo cree tu historia o, en cambio, te ve como un iluso, no puedo decirlo. Pero lo que está claro es que en cada universo, el que dejaste y en el que entraste, evitamos las circunstancias contradictorias.

Lo que es más, incluso en este contexto ampliado, su expedición de viaje en el tiempo no cambia el pasado. En el universo que dejaste, eso se manifiesta, ya que nunca visitas su pasado. En el universo en el que entras, tu presencia a las 11:50 p.m. del 31 de diciembre de 1965, no cambia ese momento: en ese universo estuviste, y siempre estarás, presente en ese momento. De nuevo, en la interpretación de Muchos Mundos, cada secuencia físicamente consistente de eventos ocurre en uno de los universos paralelos. El universo en el que entras es uno en el que se realizan las acciones asesinas que eliges emprender. Tu presencia el 31 de diciembre de 1965, y todo el caos que creas, son parte del tejido inmutable de la realidad de ese universo.

La interpretación de Muchos Mundos ofrece una resolución similar a la cuestión del conocimiento que parece materializarse de la nada, como en el escenario de la escritura de mi madre de un trabajo decisivo en la teoría de cuerdas. Según la interpretación de Muchos Mundos, en uno de los innumerables universos paralelos mi madre *se convierte* rápidamente en una experta en teoría de cuerdas, y por su cuenta descubre todo lo que leo en su trabajo. Cuando emprendo mi excursión al futuro, mi máquina del tiempo me lleva a *ese universo*. Los resultados que leí en el periódico de mi madre mientras estaba allí fueron descubiertos por la versión de mi madre en ese mundo. Luego, cuando viajo en el tiempo, entro en otro de los universos paralelos, uno en el que mi madre tiene dificultades para entender la física. Después de años de intentar enseñarle, me rindo y finalmente le digo qué escribir en el papel. Pero en este escenario no hay ningún rompecabezas con respecto a quién es responsable de los avances. El descubridor es la versión de mi madre en el universo en el que es un genio de la física. Todo lo que ha sucedido como resultado de mis varios viajes en el tiempo es que sus descubrimientos se comunican a una versión de sí misma en otro universo paralelo. Suponiendo que encuentre universos paralelos más fáciles de tragar que descubrimientos sin autor -una proposición discutible- esto proporciona una explicación menos desconcertante de la interacción entre el conocimiento y el viaje en el tiempo.

Ninguna de las propuestas que hemos discutido en esta o la sección anterior son necesariamente *la* resolución de los enigmas y paradojas del viaje en el tiempo. En cambio, estas propuestas pretenden mostrar que los rompecabezas y paradojas no descartan el viaje en el tiempo al pasado ya que, con nuestro estado actual de comprensión, la física proporciona posibles vías para la resolución de los problemas. Pero no descartar algo está muy lejos de declararlo posible. Así que ahora nos vemos obligados a hacer la pregunta principal:

¿Es posible el viaje en el tiempo al pasado?

La mayoría de los físicos sobrios responderían que no. Yo diría que no. Pero a diferencia del no definitivo que obtendrías si preguntaras si la relatividad especial permite que un objeto masivo se acelere hasta y luego exceda la velocidad de la luz, o si la teoría de Maxwell permite que una partícula con una unidad de carga eléctrica se desintegre en partículas con dos unidades de carga eléctrica, este es un no calificado.

El hecho es que nadie ha demostrado que las leyes de la física descarten absolutamente el viaje en el tiempo dirigido al pasado. Por el contrario, algunos físicos han llegado a dar instrucciones hipotéticas sobre cómo una civilización con una destreza tecnológica ilimitada, que opera plenamente dentro de las leyes conocidas de la física, podría construir una máquina del tiempo (cuando hablamos de máquinas del tiempo, siempre nos referimos a algo que es capaz de viajar tanto al futuro como al pasado). Las propuestas no se parecen al artilugio giratorio descrito por H. G. Wells o al DeLorean de Doc Brown. Y todos los elementos de diseño rozan los límites de la física conocida, lo que lleva a muchos investigadores a sospechar que con los subsiguientes refinamientos en nuestra comprensión de las leyes de la naturaleza, las propuestas existentes y futuras para las máquinas del tiempo se considerarán más allá de los límites de lo que es físicamente posible. Pero a día de hoy, esta sospecha se basa en corazonadas y pruebas circunstanciales, no en pruebas sólidas.

El propio Einstein, durante la década de intensa investigación que llevó a la publicación de su teoría general de la relatividad, reflexionó sobre la cuestión del viaje al pasado. [10 Francamente], hubiera sido extraño si no lo hubiera hecho. Mientras que su radical reelaboración del espacio y el tiempo descartaba el dogma largamente aceptado, una pregunta siempre presente era hasta dónde llegaría la agitación. ¿Qué rasgos, si es que hay alguno, del tiempo familiar, cotidiano e intuitivo sobrevivirían? Einstein nunca escribió mucho sobre el tema de los viajes en el tiempo porque, según su propio relato, nunca hizo muchos progresos. Pero en las décadas siguientes a la publicación de su trabajo sobre la relatividad general, lento pero seguro, otros físicos lo hicieron.

Entre los primeros trabajos de relatividad general con relevancia para las máquinas del tiempo se encuentran los escritos en 1937 por el físico escocés W. J. van Stockum [11] y en 1949 por un colega de Einstein en el Instituto de Estudios Avanzados, Kurt Gödel. Van Stockum estudió un hipotético problema de relatividad general en el que un cilindro muy denso e infinitamente largo se pone en movimiento giratorio alrededor de su eje (infinitamente) largo. Aunque un cilindro infinito no es físicamente realista, el análisis de van Stockum condujo a una interesante revelación. Como vimos en el capítulo 14, los objetos masivos que giran arrastran el espacio en un remolino como un torbellino. En este caso, el remolino es tan significativo que, según el análisis matemático, no sólo el espacio sino también el tiempo quedarían atrapados en el remolino. En términos generales, el giro gira en la dirección del tiempo de su lado, de modo que el

movimiento circular alrededor del cilindro te lleva al pasado. Si tu cohete rodea el cilindro, puedes volver al punto de partida en el espacio *antes de embarcarte en tu* viaje. Ciertamente, nadie puede construir un cilindro giratorio infinitamente largo, pero este trabajo fue un indicio temprano de que la relatividad general podría no prohibir el viaje en el tiempo al pasado.

El trabajo de Gödel también investigó una situación que involucraba el movimiento de rotación. Pero en lugar de centrarse en un objeto que gira en el espacio, Gödel estudió lo que sucede si todo el espacio sufre un movimiento de rotación. Mach habría pensado que esto no tenía sentido. Si todo el universo está rotando, entonces no hay nada con respecto a lo que la supuesta rotación está sucediendo. Mach concluiría que un universo en rotación y un universo estacionario son lo mismo. Pero este es otro ejemplo en el que la relatividad general no se ajusta completamente a la concepción relacional de Mach del espacio. Según la relatividad general, tiene sentido hablar de todo el universo en rotación, y con esta posibilidad vienen simples consecuencias observacionales. Por ejemplo, si disparas un rayo láser en un universo en rotación, la relatividad general muestra que parecerá que viaja a lo largo de una trayectoria espiral en lugar de una línea recta (algo así como la trayectoria que verías seguir a una bala de movimiento lento si dispararas una pistola de juguete hacia arriba mientras vas en un tiovivo). La sorprendente característica del análisis de Gödel fue su comprensión de que si su cohete siguiera las trayectorias apropiadas en un universo giratorio, también podría regresar a su lugar de origen en el espacio *antes del momento* de su partida. Un universo giratorio sería así mismo una máquina del tiempo.

Einstein felicitó a Gödel por su descubrimiento, pero sugirió que una mayor investigación podría demostrar que las soluciones a las ecuaciones de la relatividad general que permiten viajar al pasado se encuentran con otros requisitos físicos esenciales, convirtiéndolas en meras curiosidades matemáticas. En lo que respecta a la solución de Gödel, observaciones cada vez más precisas han minimizado la relevancia directa de su trabajo al establecer que nuestro universo no está rotando. Pero van Stockum y Gödel habían dejado salir al genio de la botella; en un par de décadas, se encontraron más soluciones a las ecuaciones de Einstein que permitían el viaje en el tiempo al pasado.

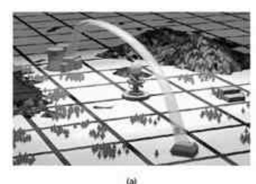
En las últimas décadas, se ha reavivado el interés por los diseños de hipotéticas máquinas del tiempo. En el decenio de 1970, Frank Tipler volvió a analizar y perfeccionó la solución de van Stockum, y en 1991, Richard Gott, de la Universidad de Princeton, descubrió otro método para construir una máquina del tiempo utilizando las llamadas cuerdas cósmicas (restos filamentosos hipotéticos, infinitamente largos, de transiciones de fase en el universo temprano). Todas estas son contribuciones importantes, pero la propuesta que es más simple de describir, usando conceptos que hemos desarrollado en capítulos anteriores, fue encontrada por Kip Thorne y sus estudiantes en el Instituto de Tecnología de California. Hace uso de los agujeros de gusano.

Planos para una máquina del tiempo de los agujeros de gusano

Primero expondré la estrategia básica para construir la máquina del tiempo de los agujeros de gusano de Thorne, y en la siguiente sección discutiré los retos a los que se enfrenta cualquier contratista que Thorne pueda contratar para ejecutar los planes.

Un agujero *de gusano* es un hipotético túnel a través del espacio. Un tipo de túnel más familiar, como el que se ha perforado a través de la ladera de una montaña, proporciona un atajo de un lugar a otro. Los agujeros de gusano cumplen una función similar, pero difieren de los túneles convencionales en un aspecto importante. Mientras que los túneles convencionales proporcionan una nueva ruta a través del espacio existente -la montaña y el espacio que ocupa existen antes de que se construya un túnel-, un agujero de gusano proporciona un túnel de un punto en el espacio a otro a lo largo de un nuevo tubo de espacio previamente inexistente. Si se quitara el túnel a través de la montaña, el espacio que ocupaba todavía existiría. Si se quitara un agujero de gusano, el espacio que ocupaba se desvanecería.

La figura 15.2a ilustra un agujero de gusano que conecta el Kwik-E-Mart y la Central Nuclear de Springfield, pero el dibujo es engañoso porque el agujero de gusano parece extenderse a través del espacio aéreo de Springfield. Más exactamente, el agujero de gusano debería pensarse como una nueva región del espacio que interactúa con el espacio ordinario y familiar sólo en sus extremos: sus bocas. Si al caminar por las calles de Springfield, recorriera el horizonte en busca del agujero de gusano, no vería nada. La única forma de verlo sería subirse al Kwik-E-Mart, donde se encontraría una abertura en el espacio ordinario: la boca de un agujero de gusano. Mirando a través de la abertura, verías el interior de la central eléctrica, la ubicación de la segunda boca, como en la figura 15.2b. Otra característica engañosa de la figura 15.2a es que el agujero de gusano no parece ser un atajo. Podemos arreglar esto modificando la ilustración como en la figura 15.3. Como se puede ver, la ruta habitual desde la central eléctrica hasta el Kwik-E-Mart es, en efecto, más larga que el nuevo pasaje espacial del agujero de gusano. Las contorsiones de la figura 15.3 reflejan las dificultades para dibujar la geometría relativista general en una página, pero la figura da un sentido intuitivo de la nueva conexión que proporcionaría un agujero de gusano.


(a)



(b)

Figura 15.2 a) Un agujero de gusano que se extiende desde el Kwik-E-Mart hasta la central nuclear. b) La vista a través del agujero de gusano, mirando desde la boca del Kwik-E-Mart y hacia la boca de la central.

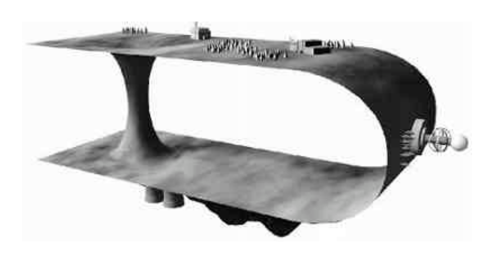


Figura 15.3 Geometría que muestra más claramente que el agujero de gusano es un atajo. (Las bocas de los agujeros de gusano están en realidad dentro del Kwik-E-Mart y de la central nuclear, aunque eso es difícil de mostrar en esta representación).

Nadie sabe si existen agujeros de gusano, pero hace muchas décadas los físicos establecieron que están permitidos por las matemáticas de la relatividad general y por lo tanto son un juego justo para el estudio teórico. En la década de 1950, John Wheeler y sus compañeros de trabajo fueron de los primeros investigadores que investigaron los agujeros de gusano, y descubrieron muchas de sus propiedades matemáticas fundamentales. Sin embargo, más recientemente, Thorne y sus colaboradores revelaron toda la riqueza de los agujeros de gusano al darse cuenta de que no sólo pueden proporcionar atajos a través del espacio, sino también a través del tiempo.

Esta es la idea. Imagina que Bart y Lisa están de pie en los extremos opuestos del agujero de gusano de Springfield-Bart en la central eléctrica, Lisa en el Kwik-E-Mart, charlando entre ellos sobre qué regalarle a Homero para su cumpleaños, cuando Bart decide hacer una breve excursión transgaláctica (para regalarle a Homero algunas de sus barritas de pescado andrómedas favoritas). Lisa no se siente bien para el viaje pero, como siempre ha querido ver a Andrómeda, convence a Bart para que cargue su boca de agujero de gusano en su nave y se la lleve, para que ella pueda echar un vistazo. Se podría esperar que esto signifique que Bart tendrá que seguir estirando el agujero de gusano más tiempo a medida que su viaje progresa, pero eso supone que el agujero de gusano conecta el Kwik-E-Mart y la nave de Bart a través del espacio ordinario. No es así. Y, como se ilustra en la figura 15.4, a través de las maravillas de la geometría relativista general, la longitud del agujero de gusano puede permanecer fija durante todo el viaje. Este es un punto clave. A pesar de que Bart se desplaza a Andrómeda, su distancia a Lisa a través del agujero de gusano no cambia. Esto pone de manifiesto el papel del agujero de gusano como un atajo a través del espacio.

Para mayor claridad, digamos que Bart se dirige al 99,999999999999999999% de la velocidad de la luz y viaja cuatro horas hacia Andrómeda, mientras continúa charlando con Lisa a través del agujero de gusano, tal como lo habían hecho antes del vuelo. Cuando

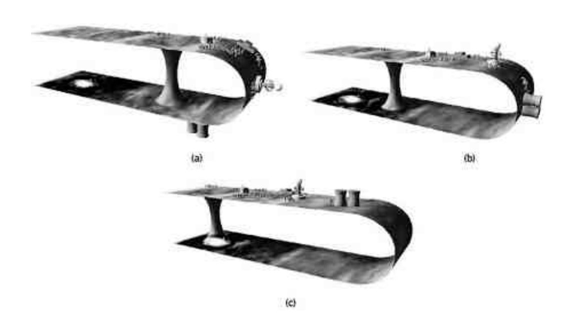


Figura 15.4 a) Un agujero de gusano que conecta el Kwik-E-Mart y la central nuclear. b) La abertura inferior del agujero de gusano transportada (desde la central nuclear) al espacio exterior (en una nave espacial, no se muestra). La longitud del agujero de gusano permanece fija. c) La abertura del agujero de gusano llega a la galaxia de Andrómeda; la otra abertura sigue estando en el Kwik-E-Mart. La longitud del agujero de gusano no cambia durante todo el viaje. Cuando la nave llega a Andrómeda, Lisa le dice a Bart que se calme para poder ver la vista sin perturbaciones. Está exasperada por su insistencia en tomar rápidamente la comida para llevar en el Paso de Peces y regresar a Springfield, pero acepta seguir charlando hasta que él regrese. Cuatro horas y unas docenas de rondas de tres en raya más tarde, Bart deja su barco a salvo en el césped de Springfield High.

Pero cuando mira por la ventana del barco, Bart se sorprende un poco. Los edificios se ven completamente diferentes, y el marcador que flota en lo alto del estadio de patinaje da una fecha de unos 6 millones de años después de su partida. "¡¿Amigo?!" se dice a sí mismo, pero un momento después todo se aclara. La relatividad especial, recuerda de un corazón a corazón que había tenido recientemente con Sideshow Bob, asegura que cuanto más rápido se viaja, más lento corre el reloj. Si viajas al espacio a alta velocidad y luego regresas, sólo habrán transcurrido unas pocas horas a bordo de tu nave mientras que, según alguien que esté parado, habrán transcurrido miles o millones de años, si no más. Con un rápido cálculo, Bart confirma que a la velocidad a la que viajaba, ocho horas transcurridas a bordo de la nave significarían 6 millones de años transcurridos en la tierra. La fecha del marcador es correcta; Bart se da cuenta de que ha viajado muy lejos en el futuro de la Tierra.

". . . ¡Bart! ¡Hola, Bart!" Lisa grita a través del agujero de gusano. "¿Me has estado escuchando? Acelera. Quiero llegar a casa a tiempo para la cena". Bart mira en su boca de agujero de gusano y le dice a Lisa que ya ha aterrizado en el césped de la secundaria de Springfield. Al mirar más de cerca a través del agujero de gusano,

Lisa ve que Bart dice la verdad, pero al mirar desde el Kwik-E-MART hacia la Secundaria de Springfield, no ve su nave en el césped. "No lo entiendo", dice.

"En realidad, tiene mucho sentido", responde Bart con orgullo. "He aterrizado en la secundaria de Springfield, pero a 6 millones de años en el futuro. No puedes verme mirando por la ventana del Kwik-E-Mart, porque estás mirando al lugar correcto, pero no estás mirando al momento correcto. Estás mirando 6 millones de años demasiado pronto."

"Oh, claro, esa cosa de la dilatación del tiempo de la relatividad especial", Lisa está de acuerdo. "Genial". De todos modos, quiero llegar a casa a tiempo para la cena, así que sube por el agujero de gusano, porque tenemos que darnos prisa." "Bien", dice Bart, arrastrándose por el agujero de gusano. Le compra un Butterfinger a Apu, y él y Lisa se van a casa.

Fíjense que aunque el paso de Bart por el agujero de gusano le llevó sólo un momento, lo transportó *6 millones de años atrás en el tiempo.* Él y su nave y la boca del agujero de gusano habían aterrizado muy lejos en el futuro de la Tierra. Si hubiera salido, hablado con la gente y consultado el periódico, todo habría confirmado esto. Sin embargo, cuando pasó por el agujero de gusano y se reunió con Lisa, se encontró de nuevo en el presente. Lo mismo es cierto para cualquiera que pudiera seguir a Bart a través de la boca del agujero de gusano: también viajaría 6 millones de años atrás en el tiempo. De manera similar, cualquiera que se suba a la boca del agujero de gusano en el Kwik-E-Mart, y salga de la boca que Bart dejó en su nave, viajaría 6 millones de años al futuro. Lo importante es que Bart no sólo llevó una de las bocas de los agujeros de gusano en un viaje por el espacio. Su viaje también transportó la boca del agujero de gusano a través del tiempo.*El viaje de Bart lo llevó a él y a la boca del agujero de gusano al futuro de la Tierra. En resumen, Bart transformó un túnel* a través del *espacio en un túnel a través del tiempo; convirtió un agujero de gusano en una máquina del tiempo.*

En la figura 15.5 se muestra una forma aproximada de visualizar lo que está pasando. En la figura 15.5a vemos un agujero de gusano que conecta una ubicación espacial con otra, con la configuración del agujero de gusano dibujada para enfatizar que se encuentra fuera del espacio ordinario.

En la figura 15.5b, mostramos la evolución temporal de este agujero de gusano, asumiendo que sus dos bocas se mantienen estacionarias. (Las porciones de tiempo son las de un observador estacionario.) En la figura 15.5c, mostramos lo que sucede cuando la boca de un agujero de gusano se carga en una nave espacial y se lleva a cabo un viaje de ida y vuelta. El tiempo de la boca en movimiento, al igual que el tiempo en un reloj en movimiento, se ralentiza, de modo que la boca en movimiento es transportada al futuro. (Si transcurre una hora en un reloj en movimiento pero mil años en los relojes estacionarios, el reloj en movimiento habrá saltado al futuro de los relojes estacionarios). Así, en lugar de que la boca del agujero de gusano estacionario se conecte, a través del túnel del agujero de gusano, a una boca en la misma franja horaria, se conecta a una boca en una franja horaria *futura*, como en la figura 15.5c. A menos que las bocas de los agujeros de gusano se muevan más lejos, la diferencia de tiempo entre ellas permanecerá encerrada. En cualquier momento, si se entra en una boca y se sale de la otra, se habrá convertido en un viajero del tiempo.

Construir una máquina del tiempo de los agujeros de gusano

Un plan para construir una máquina del tiempo está ahora claro. Paso 1: encontrar o crear un agujero de gusano lo suficientemente ancho para que tú, o cualquier cosa que quieras enviar a través del tiempo, pase. Paso 2: establecer una diferencia de tiempo entre las bocas de los agujeros de gusano, por ejemplo, moviendo una en relación a la otra. Eso es todo. En principio.

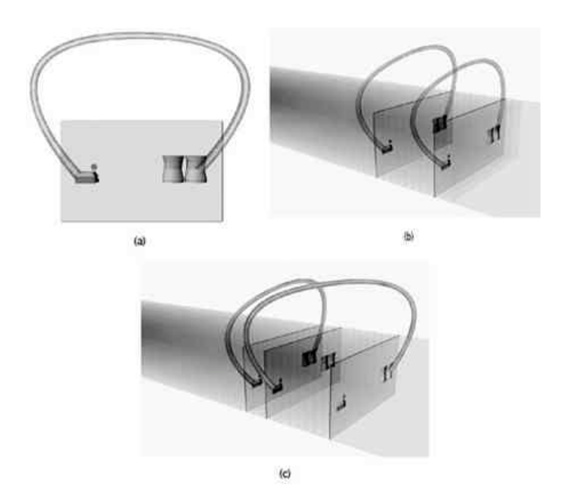


Figura 15.5 a) Un agujero de gusano, creado en algún momento en el tiempo, conecta un lugar en el espacio con otro. b) Si las bocas de los agujeros de gusano no se mueven entre sí, "pasan" por el tiempo a la misma velocidad, de modo que el túnel conecta las dos regiones al mismo tiempo. c) Si una boca de agujero de gusano se lleva a cabo en un viaje de ida y vuelta (no se muestra), transcurrirá menos tiempo para esa boca, y por lo tanto el túnel conectará las dos regiones del

espacio en momentos de tiempo diferentes. El agujero de gusano se ha convertido en una máquina del tiempo.

¿Qué tal en la práctica? Bueno, como mencioné al principio, nadie sabe si existen los agujeros de gusano. Algunos físicos han sugerido que los agujeros de gusano diminutos podrían ser abundantes en la composición microscópica del tejido espacial, siendo producidos continuamente por las fluctuaciones cuánticas del campo gravitatorio. Si es así, el desafío sería ampliar uno al tamaño macroscópico. Se han hecho propuestas sobre cómo se podría hacer esto, pero apenas van más allá de los vuelos teóricos de fantasía. Otros físicos han previsto la creación de grandes agujeros de gusano como un proyecto de ingeniería en relatividad general aplicada. Sabemos que el espacio responde a la distribución de la materia y la energía, así que con suficiente control sobre la materia y la energía, podríamos hacer que una región del espacio generara un agujero de gusano. Este enfoque presenta una complicación adicional, porque así como debemos abrir el lado de una montaña para fijar la boca de un túnel, debemos abrir el tejido del espacio para fijar la boca de un agujero de gusano.[12] Nadie sabe si tales desgarros en el espacio están permitidos por las leyes de la física. El trabajo con el que he estado involucrado en la teoría de cuerdas (ver página 386) ha demostrado que ciertos tipos de desgarros espaciales son posibles, pero hasta ahora no tenemos idea de si estos desgarros podrían ser relevantes para la creación de agujeros de gusano. La conclusión es que la adquisición intencional de un agujero de gusano macroscópico es una fantasía que, en el mejor de los casos, está *muy lejos* de ser realizada.

Más aún, incluso si de alguna manera nos las arregláramos para conseguir un agujero de gusano macroscópico, no habríamos terminado; todavía nos enfrentaríamos a un par de obstáculos importantes. Primero, en los años 60, Wheeler y Robert Fuller demostraron, usando las ecuaciones de la relatividad general, que los agujeros de gusano son inestables. Sus paredes tienden a colapsar hacia adentro en una fracción de segundo, lo que elimina su utilidad para cualquier tipo de viaje. Más recientemente, sin embargo, los físicos (incluyendo a Thorne y Morris, y también a Matt Visser) han encontrado una forma potencial de evitar el problema del colapso. Si el agujero de gusano no está vacío, sino que contiene material -llamado *materia exótica*- que puede ejercer un empuje hacia afuera en sus paredes, entonces podría ser posible mantener el agujero de gusano abierto y estable. Aunque su efecto es similar al de una constante cosmológica, la materia exótica generaría una gravedad repulsiva de empuje hacia afuera por el hecho de tener energía negativa (no sólo la presión negativa característica de una constante cosmológica [13]). En condiciones altamente especializadas, la mecánica cuántica permite la energía negativa, [14] pero sería un desafío monumental generar suficiente materia exótica para mantener abierto un agujero de gusano macroscópico. (Por ejemplo, Visser ha calculado que la cantidad de energía negativa necesaria para mantener abierto un agujero de

gusano de un metro de ancho es aproximadamente igual en magnitud a la energía total producida por el sol durante unos 10.000 millones de años. [15])

En segundo lugar, aunque de alguna manera encontráramos o creáramos un agujero de gusano macroscópico, e incluso si de alguna manera fuéramos capaces de reforzar sus paredes contra un colapso inmediato, e incluso si fuéramos capaces de inducir una diferencia de tiempo entre las bocas de los agujeros de gusano (por ejemplo, volando una boca a alta velocidad), seguiría habiendo otro obstáculo para adquirir una máquina del tiempo. Varios físicos, entre ellos Stephen Hawking, han planteado la posibilidad de que las fluctuaciones del vacío -los temblores derivados de la incertidumbre cuántica que experimentan todos los campos, incluso en el espacio vacío, analizados en el capítulo 12- puedan destruir un agujero de gusano justo cuando se estaba posicionando para ser una máquina del tiempo. La razón es que, justo en el momento en que se hace posible el viaje en el tiempo a través del agujero de gusano, puede entrar en juego un devastador mecanismo de retroalimentación, algo así como el chirrido que se genera cuando los niveles de los micrófonos y altavoces de un sistema de sonido no están ajustados adecuadamente. Las fluctuaciones de vacío del futuro pueden viajar a través del agujero de gusano al pasado, donde pueden entonces viajar a través del espacio y el tiempo ordinario al futuro, entrar en el agujero de gusano y viajar de nuevo al pasado, creando un ciclo interminable a través del agujero de gusano y llenándolo con una energía cada vez mayor. Presumiblemente, una acumulación de energía tan intensa destruiría el agujero de gusano. La investigación teórica sugiere que esto es una posibilidad real, pero los cálculos necesarios ponen a prueba nuestra comprensión actual de la relatividad general y la mecánica cuántica en el espacio tiempo curvo, por lo que no hay pruebas concluyentes.

Los desafíos para construir una máquina del tiempo de agujero de gusano son claramente inmensos. Pero la última palabra no se dará hasta que nuestra instalación con la mecánica cuántica y la gravedad se refine más, quizás a través de avances en la teoría de las supercuerdas. Aunque a nivel intuitivo los físicos están generalmente de acuerdo en que el viaje en el tiempo al pasado es imposible, a día de hoy la cuestión aún no se ha cerrado del todo.

Rubbernecking cósmico

Al pensar en el viaje en el tiempo, Hawking ha planteado un punto interesante. ¿Por qué, pregunta, si el viaje en el tiempo es posible, no hemos sido inundados con visitantes del futuro? Bueno, podría responder, tal vez lo hemos hecho. Y podría ir más lejos y decir que hemos puesto a tantos viajeros del tiempo en pabellones cerrados que la mayoría de los otros no se atreven a identificarse. Por supuesto, Hawking está medio bromeando, y yo también, pero plantea una

pregunta seria. Si usted cree, como yo, que no hemos sido visitados del futuro, ¿eso equivale a creer que el viaje en el tiempo es imposible? Seguramente, si la gente tiene éxito en la construcción de máquinas del tiempo en el futuro, algún historiador obtendrá una beca para estudiar, de cerca y personalmente, la construcción de la primera bomba atómica, o el primer viaje a la luna, o la primera incursión en la televisión de la realidad. Así que, si creemos que nadie nos ha visitado desde el futuro, quizás estamos diciendo implícitamente que creemos que nunca se construirá tal máquina del tiempo.

En realidad, sin embargo, esta no es una conclusión necesaria. *Las máquinas del tiempo que se han propuesto hasta ahora no permiten viajar a un tiempo anterior a la construcción de la primera máquina del tiempo en sí.* Para la máquina del tiempo de los agujeros de gusano, esto es fácil de ver examinando la figura 15.5. Aunque hay una diferencia de tiempo entre las bocas de los agujeros de gusano, y aunque esa diferencia permite viajar hacia adelante y hacia atrás en el tiempo, no se puede llegar a un tiempo anterior a que se estableciera la diferencia de tiempo. El agujero de gusano en sí mismo no existe en el extremo izquierdo del pan de espacio-tiempo, por lo que no hay forma de que puedas usarlo para llegar allí. Por lo tanto, si se construye la primera máquina del tiempo, digamos dentro de 10.000 años, *ese momento sin duda atraerá* a muchos turistas que viajan en el tiempo, pero todos los tiempos anteriores, como el nuestro, seguirán siendo inaccesibles.

Encuentro curioso y convincente que nuestra comprensión actual de las leyes de la naturaleza no sólo sugiera cómo evitar las aparentes paradojas del viaje en el tiempo, sino que también ofrezca propuestas sobre cómo se podría realizar realmente el viaje en el tiempo. No me malinterprete: me cuento entre los sobrios físicos que intuyen que algún día descartaremos el viaje en el tiempo al pasado. Pero hasta que haya una prueba definitiva, creo que está justificado y es apropiado mantener la mente abierta. Como mínimo, los investigadores que se centran en estos temas están profundizando sustancialmente nuestra comprensión del espacio y el tiempo en circunstancias extremas. En el mejor de los casos, pueden estar dando los primeros pasos críticos para integrarnos en la superautopista del espacio y el tiempo. Después de todo, cada momento que pasa sin que hayamos logrado construir una máquina del tiempo es un momento que estará para siempre fuera de nuestro alcance y del de todos los que le siguen.

16 - El futuro de una alusión

PERSPECTIVAS PARA EL ESPACIO Y EL TIEMPO

Los físicos pasan gran parte de sus vidas en un estado de confusión. Es un riesgo laboral. Sobresalir en física es abrazar la duda mientras se camina por el sinuoso camino de la claridad. El tentador malestar de la perplejidad es lo que inspira a

hombres y mujeres ordinarios a extraordinarias hazañas de ingenio y creatividad; nada enfoca la mente como los detalles disonantes que esperan una resolución armoniosa. Pero en el camino hacia la explicación -durante su búsqueda de nuevos marcos para abordar las cuestiones pendientes- los teóricos deben caminar con paso considerado a través de la jungla del desconcierto, guiados en su mayoría por corazonadas, tintes, pistas y cálculos. Y como la mayoría de los investigadores tienen la tendencia a cubrir sus huellas, los descubrimientos a menudo llevan poca evidencia del arduo terreno que se ha cubierto. Pero no pierdan de vista el hecho de que nada viene fácilmente. La naturaleza no revela sus secretos a la ligera.

En este libro hemos visto numerosos capítulos en la historia del intento de nuestra especie de entender el espacio y el tiempo. Y aunque hemos encontrado algunas profundas y sorprendentes percepciones, aún no hemos llegado a ese momento final de eureka en el que toda la confusión desaparece y prevalece la claridad total. Definitivamente, seguimos vagando por la selva. Entonces, ¿desde aquí a dónde? ¿Cuál es el siguiente capítulo de la historia del espacio tiempo? Por supuesto, nadie lo sabe con seguridad. Pero en los últimos años han salido a la luz una serie de pistas, y aunque todavía no se han integrado en una imagen coherente, muchos físicos creen que están insinuando el próximo gran trastorno en nuestra comprensión del cosmos. A su debido tiempo, el espacio y el tiempo tal como se conciben actualmente pueden reconocerse como meras alusiones a principios más sutiles, más profundos y más fundamentales que subyacen a la realidad física. En el capítulo final de este relato, consideremos algunas de estas pistas y vislumbremos hacia dónde podemos dirigirnos en nuestra continua búsqueda para comprender el tejido del cosmos.

¿Son el espacio y el tiempo conceptos fundamentales?

El filósofo alemán Immanuel Kant sugirió que no sólo sería difícil eliminar el espacio y el tiempo cuando se piensa y se describe el universo, sino que sería totalmente imposible. Francamente, puedo ver de dónde venía Kant. Siempre que me siento, cierro los ojos y trato de pensar en las cosas sin representarlas como ocupando el espacio o experimentando el paso del tiempo, me quedo corto. Muy corto. El espacio, a través del contexto, o el tiempo, a través de los cambios, siempre se las arregla para penetrar. Irónicamente, lo más cerca que llego de liberar mis pensamientos de una asociación directa espacio-tiempo es cuando me sumerjo en un cálculo matemático (¡a menudo relacionado con el espacio-tiempo!), porque la naturaleza del ejercicio parece capaz de engullir mis pensamientos, aunque sólo sea momentáneamente, en un escenario abstracto que parece carecer de espacio y tiempo. Pero los propios pensamientos y el cuerpo en el que tienen lugar son, a pesar de todo, una parte importante del

espacio y el tiempo que nos es familiar. Realmente eludir el espacio y el tiempo hace que escapar de tu sombra sea pan comido.

Sin embargo, muchos de los principales físicos de hoy en día sospechan que el espacio y el tiempo, aunque omnipresentes, pueden no ser verdaderamente fundamentales. Así como la dureza de una bala de cañón emerge de las propiedades colectivas de sus átomos, y así como el olor de una rosa emerge de las propiedades colectivas de sus moléculas, y así como la rapidez de un guepardo emerge de las propiedades colectivas de sus músculos, nervios y huesos, también las propiedades del espacio y el tiempo -nuestra preocupación para gran parte de este libro- pueden también emerger del comportamiento colectivo de algunos otros constituyentes más fundamentales, que todavía tenemos que identificar.

Los físicos a veces resumen esta posibilidad diciendo que el espacio tiempo puede ser una ilusión, una representación provocativa, pero cuyo significado requiere una interpretación adecuada. Después de todo, si usted fuera golpeado por una bala de cañón, o inhalara la fragancia seductora de una rosa, o viera a un guepardo velozmente ardiente, no negaría su existencia simplemente porque cada uno está compuesto de entidades más finas y básicas. Por el contrario, creo que la mayoría de nosotros estaría de acuerdo en que estas aglomeraciones de materia existen, y además, que hay mucho que aprender al estudiar cómo sus características familiares emergen de sus componentes atómicos. Pero como son compuestos, lo que no intentaríamos hacer es construir una teoría del universo basada en balas de cañón, rosas o guepardos. De forma similar, si el espacio y el tiempo resultan ser entidades compuestas, no significaría que sus manifestaciones familiares, desde el cubo de Newton hasta la gravedad de Einstein, sean ilusorias; hay pocas dudas de que el espacio y el tiempo conservarán sus posiciones omnicomprensivas en la realidad experimental, independientemente de los futuros desarrollos en nuestra comprensión. En su lugar, el espacio tiempo compuesto significaría que aún está por descubrir una descripción aún más elemental del universo, que no tiene espacio ni tiempo. La ilusión, entonces, sería una creación nuestra: la creencia errónea de que la comprensión más profunda del cosmos llevaría el espacio y el tiempo al enfoque más agudo posible. Así como la dureza de una bala de cañón, el olor de la rosa y la velocidad del guepardo desaparecen cuando se examina la materia a nivel atómico y subatómico, el espacio y el tiempo pueden disolverse de manera similar cuando se examinan con la formulación más fundamental de las leyes de la naturaleza.

Que el espacio tiempo no esté entre los ingredientes cósmicos fundamentales puede parecerle un tanto inverosímil. Y puede que tengas razón. Pero los rumores de la inminente partida del espacio tiempo de las leyes físicas profundas no nacen de teorías alocadas. En su lugar, esta idea es fuertemente sugerida por un número de consideraciones bien razonadas. Echemos un vistazo a algunas de las más prominentes.

Promedio cuántico

En el capítulo 12 discutimos cómo el tejido del espacio, como todo lo demás en nuestro universo cuántico, está sujeto a los nervios de la incertidumbre cuántica. Son estas fluctuaciones, como recordarán, las que hacen fracasar las teorías de las partículas puntuales, impidiendo que proporcionen una teoría cuántica sensata de la gravedad. Al sustituir las partículas puntuales por bucles y recortes, la teoría de cuerdas extiende las fluctuaciones - reduciendo sustancialmente su magnitud - y así es como produce una unificación exitosa de la mecánica cuántica y la relatividad general. No obstante, las fluctuaciones disminuidas del espacio tiempo ciertamente aún existen (como se ilustra en el penúltimo nivel de aumento de la figura 12.2), y dentro de ellas podemos encontrar importantes pistas sobre el destino del espacio tiempo.

Primero, aprendemos que el espacio y el tiempo familiar que impregnan nuestros pensamientos y apoyan nuestras ecuaciones emergen de una especie de proceso de promediación. Piensa en la imagen pixelada que ves cuando tu cara está a unos pocos centímetros de una pantalla de televisión. Esta imagen es muy diferente de lo que ves a una distancia más cómoda, porque una vez que ya no puedes resolver los píxeles individuales, tus ojos los combinan en un promedio que parece suave. Pero noten que es sólo a través del proceso de promediación que los píxeles producen una imagen continua y familiar. En una línea similar, la estructura microscópica del espacio-tiempo está plagada de ondulaciones aleatorias, pero no somos directamente conscientes de ellas porque carecemos de la capacidad de resolver el espacio-tiempo en escalas tan diminutas. En su lugar, nuestros ojos, e incluso nuestro equipo más poderoso, combinan las ondulaciones en un promedio, muy parecido a lo que sucede con los píxeles de la televisión. Debido a que las ondulaciones son aleatorias, típicamente hay tantas ondulaciones "arriba" en una pequeña región como "abajo", así que cuando se promedian tienden a anularse, produciendo un plácido espacio-tiempo. Pero, como en la analogía de la televisión, es *sólo debido al proceso de promediación que emerge una forma suave y tranquila para el espacio-tiempo.*

El promedio cuántico proporciona una interpretación realista de la afirmación de que el espacio tiempo familiar puede ser ilusorio. Los promedios son útiles para muchos propósitos pero, por su diseño, no proporcionan una imagen nítida de los detalles subyacentes. Aunque la familia promedio en los EE.UU. tiene 2,2 hijos, estarías en un aprieto si te pidiera que visitaras a esa familia. Y aunque el precio medio nacional del galón de leche es de 2.783 dólares, es poco probable que encuentres una tienda que lo venda exactamente a este precio. Así que, también, el espacio tiempo familiar, en sí mismo el resultado de un proceso de promediación, puede que no describa los detalles de algo que querríamos llamar fundamental. El espacio y el tiempo pueden ser sólo aproximaciones, concepciones colectivas, extremadamente útiles para analizar el universo en todas

las escalas excepto la ultramicroscópica, pero tan ilusorias como una familia con 2,2 hijos.

Una segunda y relacionada visión es que los cada vez más intensos nervios cuánticos que surgen en las escalas decrecientes sugieren que la noción de poder dividir las distancias o duraciones en unidades cada vez más pequeñas probablemente llega a su fin alrededor de la longitud de Planck (10^{-33} centímetros) y el tiempo de Planck (10^{-43} segundos). Encontramos esta idea en el capítulo 12, donde subrayamos que, aunque la noción está completamente en desacuerdo con nuestras experiencias habituales de espacio y tiempo, no es particularmente sorprendente que una propiedad relevante para lo cotidiano no sobreviva cuando es empujada al microrrelieve. Y como la divisibilidad arbitraria del espacio y el tiempo es una de sus propiedades cotidianas más conocidas, la inaplicabilidad de este concepto a escalas ultrapequeñas da otra pista de que hay algo más al acecho en las microprofundidades -algo que podría llamarse el sustrato desnudo del espacio tiempo-, la entidad a la que alude la noción familiar de espacio tiempo. Esperamos que este *ur* -ingrediente, este material más elemental del espacio tiempo, no permita la disección en trozos cada vez más pequeños debido a las violentas fluctuaciones que se encontrarían en última instancia, y por lo tanto es bastante diferente del espacio tiempo a gran escala que experimentamos directamente. Parece probable, por lo tanto, que la apariencia de los constituyentes fundamentales del espaciotiempo, sean cuales sean, se vea alterada significativamente a través del proceso de promediación por el cual producen el espaciotiempo de la experiencia común.

Por lo tanto, buscar el espacio tiempo familiar en las leyes más profundas de la naturaleza puede ser como tratar de tomar en la Novena Sinfonía de Beethoven nota por nota o en una de las pinturas de pajares de Monet sólo pincelada por pincelada. Como estas obras maestras de la expresión humana, el conjunto espacio-tiempo de la naturaleza puede ser tan diferente de sus partes que nada parecido a ella existe en el nivel más fundamental.

La geometría en la traducción

Otra consideración, que los físicos llaman *dualidad geométrica,* también sugiere que el espacio tiempo puede no ser fundamental, pero lo sugiere desde un punto de vista muy diferente. Su descripción es un poco más técnica que la del promedio cuántico, así que no dude en pasar al modo "skim" si en algún momento esta sección se vuelve demasiado pesada. Pero debido a que muchos investigadores consideran que este material está entre las características más emblemáticas de la teoría de cuerdas, vale la pena tratar de entender lo esencial de las ideas.

En el capítulo 13 vimos cómo las cinco teorías de cuerdas supuestamente distintas son en realidad diferentes traducciones de una misma teoría. Entre otras cosas, enfatizamos que esta es una realización poderosa porque, cuando se traducen, las preguntas supremamente difíciles a veces se vuelven mucho más simples de responder. Pero hay una característica del diccionario de traducción que unifica las cinco teorías que hasta ahora he olvidado mencionar. Al igual que el grado de dificultad de una pregunta puede cambiarse radicalmente por la traducción de una formulación de cuerda a otra, también puede hacerlo la descripción de la forma geométrica del espacio tiempo. Esto es lo que quiero decir.

Debido a que la teoría de cuerdas requiere más que las tres dimensiones espaciales y la dimensión temporal de la experiencia común, en los capítulos 12 y 13 nos sentimos motivados para abordar la cuestión de dónde podrían estar ocultas las dimensiones adicionales. La respuesta que encontramos es que pueden estar acurrucadas en un tamaño que, hasta ahora, ha eludido la detección porque es más pequeño de lo que somos capaces de explorar experimentalmente. También encontramos que la física en nuestras grandes dimensiones familiares depende del tamaño y forma precisos de las dimensiones adicionales, porque sus propiedades geométricas afectan a los patrones de vibración que las cuerdas pueden ejecutar. Bien. Ahora para la parte que dejé fuera.

El diccionario que traduce las preguntas planteadas en una teoría de cuerdas a diferentes preguntas planteadas en otra teoría de cuerdas *también traduce la geometría de las dimensiones adicionales en la primera teoría a una diferente geometría extra-dimensional en la segunda teoría.* Si, por ejemplo, estás estudiando las implicaciones físicas de, digamos, la teoría de cuerdas del Tipo IIA con dimensiones extra enroscadas en un tamaño y forma particular, entonces cada conclusión a la que llegas puede, al menos en principio, ser deducida considerando las preguntas traducidas apropiadamente en, digamos, la teoría de cuerdas del Tipo IIB. Pero el diccionario para llevar a cabo la traducción *exige* que las dimensiones adicionales en la teoría de cuerdas Tipo IIB se enrosquen en una forma geométrica precisa que depende de *-pero generalmente difiere de-* la forma

dada por la teoría Tipo IIA. En resumen, una teoría de cuerdas dada con dimensiones enroscadas en una forma geométrica es equivalente a -es una traducción de- otra teoría de cuerdas con dimensiones enroscadas en una forma geométrica *diferente*.

Y las diferencias en la geometría del espacio-tiempo no tienen por qué ser menores. Por ejemplo, si una de las dimensiones adicionales de, digamos, la teoría de cuerdas del Tipo IIA debe enroscarse en un círculo, como en la figura 12.7, el diccionario de traducción muestra que esto es absolutamente equivalente a la teoría de cuerdas del Tipo IIB con una de sus dimensiones adicionales también enroscada en un círculo, pero cuyo radio es *inversamente* proporcional al original. Si un círculo es pequeño, el otro es grande, y viceversa, y sin embargo no hay absolutamente ninguna manera de distinguir entre las dos geometrías. (Expresando las longitudes como múltiplos de la longitud de Planck, si un círculo tiene radio *R,* el diccionario matemático muestra que el otro círculo tiene radio 1/ *R*). Se podría pensar que se podría distinguir fácil e inmediatamente entre una dimensión grande y una pequeña, pero en la teoría de cuerdas esto no siempre es así. Todas las observaciones se derivan de las interacciones de las cuerdas, y estas dos teorías, la Tipo IIA con una gran dimensión circular y la Tipo IIB con una pequeña dimensión circular, son meramente diferentes traducciones de -diferentes formas de expresar- la misma física. Cada observación que se describe dentro de una teoría de cuerdas tiene una descripción alternativa e igualmente viable dentro de la otra teoría de cuerdas, aunque el lenguaje de cada teoría y la interpretación que da puede ser diferente. (Esto es posible porque hay dos configuraciones cualitativamente diferentes para las cuerdas que se mueven en una dimensión circular: aquellas en las que la cuerda se envuelve alrededor del círculo como una banda elástica alrededor de una lata, y aquellas en las que la cuerda reside en una porción del círculo pero no se envuelve alrededor de él. Los primeros tienen energías que son *proporcionales* al radio del círculo [cuanto mayor es el radio, más largas son las cuerdas envueltas, por lo que incorporan más energía], mientras que los segundos tienen energías que son inversamente *proporcionales* al radio [cuanto menor es el radio, más dobladillo tienen las cuerdas, por lo que se mueven con más energía debido a la incertidumbre cuántica]. Obsérvese que si sustituyéramos el círculo original por uno de radio *invertido*, mientras que también intercambiamos cuerdas "envueltas" y "no envueltas", las energías físicas -y, resulta, la física en general- no se verían afectadas. Esto es exactamente lo que requiere el diccionario que traduce de la teoría del Tipo IIA a la teoría del Tipo IIB, y por qué dos geometrías aparentemente diferentes - una dimensión circular grande y otra pequeña - pueden ser equivalentes).

Una idea similar también se aplica cuando las dimensiones circulares se sustituyen por las formas más complicadas de Calabi-Yau introducidas en el capítulo 12. Una teoría de cuerdas dada con dimensiones adicionales enroscadas en una forma particular de Calabi-Yau es traducida por el diccionario en una teoría de cuerdas diferente con dimensiones adicionales enroscadas en una forma

diferente de Calabi-Yau (una que se llama el *espejo* o *dual* del original). En estos casos, no sólo pueden diferir los tamaños de los Calabi-Yau, sino también sus formas, incluyendo el número y la variedad de sus agujeros. Pero el diccionario de traducción asegura que difieren de la manera correcta, de modo que aunque las dimensiones adicionales tienen diferentes tamaños y formas, la física que sigue de cada teoría es absolutamente idéntica. (Hay dos tipos de agujeros en una forma determinada de Calabi-Yau, pero resulta que los patrones de vibración de las cuerdas -y por lo tanto las implicaciones físicas- son sensibles sólo a la *diferencia* entre el número de agujeros de cada tipo. Así que si un Calabi-Yau tiene, digamos, dos agujeros del primer tipo y cinco del segundo, mientras que otro Calabi-Yau tiene cinco agujeros del primer tipo y dos del segundo, entonces aunque difieran como formas geométricas, pueden dar lugar a una física idéntica. [44])

Desde otra perspectiva, entonces, esto refuerza la sospecha de que el espacio no es un concepto fundamental. Alguien que describe el universo utilizando una de las cinco teorías de cuerdas afirmaría que el espacio, incluyendo las dimensiones adicionales, tiene un tamaño y una forma particular, mientras que otra persona que utiliza una de las otras teorías de cuerdas afirmaría que el espacio, incluyendo las dimensiones adicionales, tiene un tamaño y una forma diferentes. Debido a que los dos observadores simplemente estarían utilizando descripciones *matemáticas* alternativas del mismo universo *físico*, no es que uno esté en lo cierto y el otro no. Ambos tendrían razón, aunque sus conclusiones sobre el espacio, su tamaño y forma, serían diferentes. Obsérvese también que no es que estuvieran dividiendo el espacio tiempo de maneras diferentes e igualmente válidas, como en la relatividad especial. Estos dos observadores no se pondrían de acuerdo sobre la estructura general del propio espacio tiempo. Y ese es el punto. Si el espacio tiempo fuera realmente fundamental, la mayoría de los físicos esperan que todo el mundo, independientemente de la perspectiva -independientemente del lenguaje o la teoría utilizados- se ponga de acuerdo sobre sus propiedades geométricas. Pero el hecho de que, al menos dentro de la teoría de cuerdas, esto no tiene por qué ser así, sugiere que el espacio tiempo puede ser un fenómeno secundario.

Por lo tanto, nos vemos obligados a preguntar: si las pistas descritas en las dos últimas secciones nos están apuntando en la dirección correcta, y el espacio tiempo familiar no es más que una manifestación a gran escala de alguna entidad más fundamental, ¿qué es esa entidad y cuáles son sus propiedades esenciales? A día de hoy, nadie lo sabe. Pero en la búsqueda de respuestas, los investigadores han encontrado aún más pistas, y las más importantes han surgido al pensar en los agujeros negros.

¿Por qué la entropía de los agujeros negros?

Los agujeros negros tienen las caras de póquer más inescrutables del universo. Desde el exterior, parecen tan simples como se puede conseguir. Los tres rasgos distintivos de un agujero negro son su masa (que determina su tamaño, la distancia desde su centro hasta su horizonte de sucesos, la superficie envolvente de no retorno), su carga eléctrica y la velocidad de giro. Eso es todo. No hay más detalles que se puedan deducir del escrutinio del rostro que un agujero negro presenta al cosmos. Los físicos lo resumen con el dicho "Los agujeros negros no tienen pelo", lo que significa que carecen del tipo de características detalladas que permiten la individualidad. Cuando has visto un agujero negro con una masa, carga y giro dados (aunque los has aprendido indirectamente, a través de su efecto en el gas y las estrellas circundantes, ya que los agujeros negros son negros), definitivamente los has visto todos.

Sin embargo, detrás de sus rostros pétreos, los agujeros negros albergan las mayores reservas de caos que el universo ha conocido. Entre todos los sistemas físicos de un tamaño determinado con *cualquier* composición posible, los agujeros negros contienen la mayor entropía posible. Recordemos en el capítulo 6 que una forma aproximada de pensar sobre esto viene directamente de la definición de entropía como una medida del número de reordenamientos de los constituyentes internos de un objeto que no tienen efecto en su apariencia. Cuando se trata de los agujeros negros, aunque no podemos decir cuáles son sus constituyentes, ya que no sabemos lo que sucede cuando la materia es aplastada en el centro del agujero negro, podemos decir con confianza que la reorganización de estos constituyentes no afectará más la masa, la carga o el giro de un agujero negro que la reorganización de las páginas en *Guerra y Paz afectará* el peso del libro. Y dado que la masa, la carga y el giro determinan completamente la cara que un agujero negro muestra al mundo exterior, *todas* estas manipulaciones pasan desapercibidas y podemos decir que un agujero negro tiene una entropía máxima.

Aún así, podrías sugerir que se supere la entropía de un agujero negro de la siguiente manera simple. Construya una esfera hueca del mismo tamaño que un agujero negro dado y llénela de gas (hidrógeno, helio, dióxido de carbono, lo que sea) que permita que se extienda por su interior. Cuanto más gas se bombee, mayor será la entropía, ya que más constituyentes significa más posibles reordenamientos. Se podría suponer, entonces, que si se sigue bombeando y bombeando, la entropía del gas aumentará constantemente y, por lo tanto, eventualmente excederá la del agujero negro dado. Es una estrategia inteligente, pero la relatividad general muestra que falla. Cuanto más gas se bombea, más masivo se vuelve el contenido de la esfera. Y antes de llegar a la entropía de un agujero negro de igual tamaño, la masa cada vez más grande dentro de la esfera alcanzará un valor crítico que hace que la esfera y su contenido se conviertan *en* un agujero *negro.* Simplemente no hay forma de evitarlo. Los agujeros negros tienen el monopolio del máximo desorden.

¿Qué pasa si tratas de aumentar aún más la entropía en el espacio dentro del propio agujero negro continuando bombeando más gas? La entropía seguirá aumentando, pero habrás cambiado las reglas del juego. A medida que la materia se sumerge en el voraz horizonte de sucesos de un agujero negro, no sólo aumenta la entropía del agujero negro, sino que también *aumenta su tamaño.* El tamaño de un agujero negro es proporcional a su masa, así que a medida que arrojas más materia al agujero, se hace más pesado y más grande. Por lo tanto, una vez que se maximiza la entropía en una región del espacio mediante la creación de un agujero negro, cualquier intento de aumentar aún más la entropía en esa región fracasará. La región no puede soportar más desorden. Está saturada de entropía. Hagas lo que hagas, ya sea bombeando gas o lanzando un Hummer, necesariamente harás que el agujero negro crezca y por lo tanto rodee una región espacial más grande. Por lo tanto, la cantidad de entropía contenida dentro de un agujero negro no sólo nos dice una característica fundamental del agujero negro, sino que también nos dice algo fundamental sobre el espacio *en sí mismo*: *la máxima entropía que puede ser atestada en una región del espacio -cualquier región del espacio, en cualquier lugar, en cualquier momento- es igual a la entropía contenida dentro de un agujero negro cuyo tamaño es igual al de la región en cuestión.*

Entonces, ¿cuánta entropía contiene un agujero negro de un tamaño determinado? Aquí es donde las cosas se ponen interesantes. Razonando intuitivamente, comienza con algo más fácil de visualizar, como el aire en un contenedor Tupperware. Si uniera dos de estos contenedores, duplicando el volumen total y el número de moléculas de aire, podría suponer que duplicaría la entropía. Los cálculos detallados confirman [1] esta conclusión y muestran que, siendo todo lo demás igual (temperatura, densidad, etc. invariables), las entropías de los sistemas físicos conocidos son proporcionales a sus volúmenes. Una siguiente suposición natural es que la misma conclusión también se aplicaría a cosas menos familiares, como los agujeros negros, lo que nos lleva a esperar que la entropía de un agujero negro también es proporcional a su volumen.

Pero en la década de 1970, Jacob Bekenstein y Stephen Hawking descubrieron que esto no está bien. Sus análisis matemáticos mostraron que la entropía de un agujero negro no es proporcional a su volumen, sino que es proporcional al *área* de su horizonte de sucesos, en términos generales, a su superficie. Esta es una respuesta muy diferente. Si duplicaras el radio de un agujero negro, su volumen aumentaría en un factor de 8 (2^3), mientras que su superficie sólo aumentaría en un factor de 4 (2^2); si aumentaras su radio en un factor de cien, su volumen aumentaría en un factor de un millón (100^3), mientras que su superficie sólo aumentaría en un factor de 10.000 (100^2). Los grandes agujeros negros tienen mucho más volumen que superficie. [2] Así, aunque los agujeros negros contienen la mayor entropía entre todas las cosas de un tamaño determinado, Bekenstein y Hawking mostraron que la cantidad de entropía que contienen es menor que la que ingenuamente adivinamos.

Esa entropía es proporcional a la superficie, no es sólo una curiosa distinción entre agujeros negros y Tupperware, sobre la que podemos tomar nota y avanzar rápidamente. Hemos visto que los agujeros negros establecen un límite a la cantidad de entropía que, incluso en principio, puede ser atestada en una región del espacio: tomemos un agujero negro cuyo tamaño es precisamente igual al de la región en cuestión, averigüemos cuánta entropía tiene el agujero negro, y ese *es* el límite absoluto de la cantidad de entropía que la región del espacio puede contener. Dado que esta entropía, como mostraron los trabajos de Bekenstein y Hawking, es proporcional a la superficie del agujero negro -que es igual a la superficie de la región, ya que los elegimos para que tengan el mismo tamaño- concluimos que la entropía máxima que puede contener cualquier región del espacio es proporcional a la superficie de la región. [3]

La discrepancia entre esta conclusión y la encontrada al pensar en el aire atrapado en Tupperware (donde encontramos que la cantidad de entropía es proporcional al *volumen del* Tupperware, no a su área de superficie) es fácil de precisar: Como asumimos que el aire estaba uniformemente esparcido, el razonamiento de Tupperware ignoró la gravedad; recuerden, cuando la gravedad importa, las cosas se aglomeran. Ignorar la gravedad está bien cuando las densidades son bajas, pero cuando se considera una gran entropía, las densidades son altas, la gravedad importa, y el razonamiento de Tupperware ya no es válido. En cambio, tales condiciones extremas requieren los cálculos basados en la gravedad de Bekenstein y Hawking, con la conclusión de que el potencial máximo de entropía para una región del espacio es proporcional a su superficie, no a su volumen.

Está bien, pero ¿por qué debería importarnos? Hay dos razones.

En primer lugar, la entropía ligada da otra pista de que el espacio ultramicroscópico tiene una estructura atomizada. En detalle, Bekenstein y Hawking encontraron que si se imagina dibujar un patrón de tablero de ajedrez en el horizonte de sucesos de un agujero negro, con cada cuadrado siendo una longitud de Planck por una longitud de Planck (por lo que cada uno de tales "cuadrados de Planck" tiene un área de unos 10^{-66} centímetros cuadrados), entonces la entropía del agujero negro es igual al número de tales cuadrados que pueden caber en su superficie. [4] Es difícil no ver la conclusión a la que este resultado apunta fuertemente: cada cuadrado de Planck es una unidad mínima y fundamental del espacio, y cada uno lleva una unidad mínima y única de entropía. Esto sugiere que no hay nada, ni siquiera en principio, que pueda tener lugar *dentro de* un cuadrado de Planck, porque cualquier actividad de este tipo podría apoyar el desorden y por lo tanto el cuadrado de Planck podría contener más que la única unidad de entropía encontrada por Bekenstein y Hawking. Una vez más, entonces, desde una perspectiva completamente diferente nos lleva a la noción de una entidad espacial elemental. [5]

En segundo lugar, para un físico, el límite superior de la entropía que puede existir en una región del espacio es una cantidad crítica, casi sagrada. Para entender por qué, imagina que trabajas para un psiquiatra del comportamiento, y tu trabajo es mantener un registro detallado, momento a momento, de las interacciones entre grupos de niños pequeños intensamente hiperactivos. Cada mañana rezas para que el grupo del día se comporte bien, porque cuanto más alboroto creen los niños, más difícil será tu trabajo. La razón es intuitivamente obvia, pero vale la pena decirlo explícitamente: cuanto más desordenados sean los niños, más cosas hay que tener en cuenta. El universo presenta a un físico con el mismo desafío. Una teoría física fundamental está destinada a describir todo lo que ocurre o podría ocurrir, incluso en principio, en una región determinada del espacio. Y, como en el caso de los niños, cuanto más desorden pueda contener la región, incluso en principio, más cosas debe ser capaz de seguir la teoría. Por lo tanto, la máxima entropía que puede contener una región proporciona una simple pero incisiva prueba de fuego: los físicos esperan que una teoría verdaderamente fundamental sea una que se ajuste perfectamente a la máxima entropía en cualquier región espacial dada. La teoría debe estar tan estrechamente en sintonía con la naturaleza que su máxima capacidad para seguir la pista del desorden sea *exactamente igual* al máximo desorden que una región puede contener, ni más ni menos.

El asunto es que, si la conclusión de Tupperware hubiera tenido una validez ilimitada, una teoría fundamental habría necesitado la capacidad de dar cuenta de un volumen de desorden en cualquier región. Pero como ese razonamiento falla cuando se incluye la gravedad, y como una teoría fundamental debe incluir la gravedad, aprendemos que una teoría fundamental sólo tiene que ser capaz de explicar el valor del desorden de una superficie en cualquier región. Y como mostramos con un par de ejemplos numéricos hace unos pocos párrafos, para las grandes regiones la última es mucho más pequeña que la primera.

Así, el resultado de Bekenstein y Hawking nos dice que una teoría que incluye la gravedad es, en cierto sentido, más simple que una teoría que no la incluye. Hay menos "grados de libertad" -menos cosas que pueden cambiar y por lo tanto contribuir al desorden- que la teoría debe describir. Esta es una realización interesante por sí misma, pero si seguimos esta línea de razonamiento un paso más allá, parece decirnos algo extremadamente extraño. Si la entropía máxima en una región determinada del espacio es proporcional a la superficie de la región y no a su volumen, entonces tal vez los verdaderos y fundamentales grados de libertad -los atributos que tienen el potencial de dar lugar a ese *desorden- residen en realidad en la superficie de la región y no en su volumen.* Tal vez, es decir, los verdaderos procesos físicos del universo tienen lugar en una superficie delgada y distante que nos rodea, y todo lo que vemos y experimentamos es simplemente una proyección de esos procesos. Tal vez, es decir, el universo es más bien como un holograma.

Esta es una idea extraña, pero como vamos a discutir ahora, ha recibido recientemente un apoyo sustancial.

¿Es el Universo un Holograma?

Un holograma es una pieza bidimensional de plástico grabado, que, cuando se ilumina con la luz láser apropiada, proyecta una imagen tridimensional. [6] A principios de los años 90, el premio Nobel holandés Gerard 't Hooft y Leonard Susskind, el mismo físico que acuñó la teoría de las cuerdas, sugirieron que el propio universo podría funcionar de forma análoga a un holograma. Ellos plantearon la sorprendente idea de que las idas y venidas que observamos en las tres dimensiones de la vida cotidiana podrían ser en sí mismas proyecciones holográficas de procesos físicos que tienen lugar en una superficie distante y bidimensional. En su nueva y peculiar visión, nosotros y todo lo que hacemos o vemos sería similar a las imágenes holográficas. Mientras que Platón imaginaba que las percepciones comunes revelaban una mera sombra de la realidad, el principio holográfico coincide, pero le da la vuelta a la metáfora. Las sombras -las cosas que se aplanan y por lo tanto viven en una superficie de dimensiones inferiores- son reales, mientras que lo que parecen ser las entidades de dimensiones superiores, más ricamente estructuradas (nosotros; el mundo que nos rodea) son proyecciones evanescentes de las sombras.[45]

De nuevo, aunque es una idea fantásticamente extraña, y cuyo papel en la comprensión final del espacio tiempo está lejos de ser claro, el llamado *principio holográfico de* Hooft y Susskind está bien motivado. Porque, como discutimos en la última sección, la máxima entropía que una región del espacio puede contener escalas con el área de su superficie, no con el volumen de su interior. Es natural adivinar, entonces, que los ingredientes más fundamentales del universo, sus grados de libertad más básicos -las entidades que pueden llevar la entropía del universo de la misma manera que las páginas de la *Guerra y la Paz* llevan su entropía- residirían en una superficie delimitada y no en el interior del universo. Lo que experimentamos en el "volumen" del universo, en la masa*,* como los físicos a menudo lo llaman, estaría determinado por lo que ocurre en la superficie delimitada, de la misma manera que lo que vemos en una proyección holográfica está determinado por la información codificada en un trozo de plástico delimitado. Las leyes de la física actuarían como el láser del universo, iluminando los procesos reales del cosmos -procesos que tienen lugar en una superficie fina y distante- y generando las ilusiones holográficas de la vida cotidiana.

Aún no hemos descubierto cómo este principio holográfico podría realizarse en el mundo real. Un desafío es que en las descripciones convencionales el universo se imagina que o bien sigue para siempre, o si no, se envuelve sobre sí mismo como una esfera o una pantalla de videojuego (como en el capítulo 8), y por lo tanto no

tendría bordes o límites. Así que, ¿dónde se ubicaría la supuesta "superficie holográfica delimitada"? Además, los procesos físicos ciertamente parecen estar bajo nuestro control, justo aquí, en lo profundo del interior del universo. No parece que algo en un límite difícil de localizar esté de alguna manera tomando las decisiones sobre lo que sucede aquí en la mayoría. ¿Implica el principio holográfico que *ese* sentido de control y autonomía es ilusorio? ¿O es mejor pensar en la holografía como la articulación de una especie de dualidad en la que, sobre la base del gusto -no de la física- se puede elegir una descripción familiar en la que las leyes fundamentales operan aquí en la masa (que se alinea con la intuición y la percepción) o una descripción desconocida en la que la física fundamental tiene lugar en algún tipo de límite del universo, siendo cada punto de vista igualmente válido? Estas son preguntas esenciales que siguen siendo controvertidas.

Pero en 1997, basándose en los conocimientos previos de varios teóricos de cuerdas, el físico argentino Juan Maldacena tuvo un gran avance que hizo avanzar dramáticamente el pensamiento sobre estos asuntos. Su descubrimiento no es directamente relevante para la cuestión del papel de la holografía en nuestro universo real, pero en la manera tradicional de la física, encontró un contexto hipotético -un universo hipotético- en el que las reflexiones abstractas sobre la holografía podían hacerse concretas y precisas usando las matemáticas. Por razones técnicas, Maldacena estudió un universo hipotético con cuatro grandes dimensiones espaciales y una dimensión temporal que tienen una curvatura negativa uniforme, una versión de mayor dimensión de la papa frita de Pringle, Figura 8.6c. El análisis matemático estándar revela que este espacio tiempo de cinco dimensiones tiene un límite [7] que, como todos los límites, tiene una dimensión menos que la forma que limita: tres dimensiones espaciales y una dimensión temporal. (Como siempre, los espacios de dimensiones superiores son difíciles de imaginar, así que si quiere una imagen mental, piense en una lata de sopa de tomate - la sopa líquida tridimensional es análoga al espaciotiempo de cinco dimensiones, mientras que la superficie bidimensional de la lata es análoga a la frontera del espaciotiempo de cuatro dimensiones). Después de incluir dimensiones adicionales enroscadas como lo requiere la teoría de las cuerdas, Maldacena argumentó de manera convincente que la física presenciada por un observador que vive en este universo (un observador en la "sopa") podría describirse completamente en términos de la física que tiene lugar en el límite del universo (física en la superficie de la lata).

Aunque no es realista, este trabajo proporcionó el primer ejemplo concreto y matemáticamente manejable en el que el principio holográfico se realizó explícitamente. [8] Al hacerlo, arrojó mucha luz sobre la noción de holografía aplicada a todo un universo. Por ejemplo, en la obra de Maldacena, la descripción de la masa y la descripción de los límites están en un pie de igualdad absoluto. Una no es primaria y la otra es secundaria. Con el mismo espíritu que la relación entre las cinco teorías de cuerdas, las teorías de la masa y de los límites son

traducciones de cada una de ellas. La característica inusual de esta traducción particular, sin embargo, es que la teoría de la masa tiene más dimensiones que la teoría equivalente formulada sobre los límites. Además, mientras que la teoría de la masa incluye la gravedad (ya que Maldacena la formuló utilizando la teoría de las cuerdas), los cálculos muestran que la teoría de los límites no la incluye. No obstante, cualquier pregunta formulada o cálculo realizado en una de las teorías puede traducirse en una pregunta o cálculo equivalente en la otra. Aunque alguien que no esté familiarizado con el diccionario pensaría que las preguntas y cálculos correspondientes no tienen absolutamente nada que ver entre sí (por ejemplo, como la teoría de los límites no incluye la gravedad, las preguntas sobre la gravedad en la teoría de la masa se traducen a preguntas muy diferentes y sin gravedad en la teoría de los límites), alguien que conozca bien ambos idiomas -un experto en ambas teorías- reconocería su relación y se daría cuenta de que las respuestas a las preguntas correspondientes y los resultados de los cálculos correspondientes deben coincidir. De hecho, todos los cálculos realizados hasta la fecha, y ha habido muchos, apoyan esta afirmación.

Los detalles de todo esto son difíciles de comprender plenamente, pero no dejes que eso oscurezca el punto principal. El resultado de Maldacena es asombroso. Encontró una realización concreta, aunque hipotética, de la holografía dentro de la teoría de las cuerdas. Demostró que una teoría cuántica particular sin gravedad es una traducción de - es indistinguible de - otra teoría cuántica que incluye la gravedad pero está formulada con una dimensión espacial más. Se están llevando a cabo vigorosos programas de investigación para determinar cómo estos conocimientos podrían aplicarse a un universo más realista, nuestro universo, pero el progreso es lento ya que el análisis está lleno de obstáculos técnicos. (Maldacena eligió el ejemplo hipotético particular que hizo porque demostró ser relativamente fácil de analizar matemáticamente; los ejemplos más realistas son mucho más difíciles de tratar). No obstante, ahora sabemos que la teoría de cuerdas, al menos en ciertos contextos, tiene la capacidad de apoyar el concepto de holografía. Y, como en el caso de las traducciones geométricas descritas anteriormente, esto proporciona otro indicio de que el espacio tiempo no es fundamental. No sólo el tamaño y la forma del espacio-tiempo pueden cambiar en la traducción de una formulación de una teoría a otra, de forma equivalente, sino que también puede cambiar el *número* de dimensiones del espacio.

Cada vez más, estas pistas apuntan a la conclusión de que la forma del espacio tiempo es un detalle adorable que varía de una formulación de una teoría física a otra, en lugar de ser un elemento fundamental de la realidad. Así como el número de letras, sílabas y vocales de la palabra *gato difieren* de las de *gato,* su traducción al español, la forma del espacio-tiempo, su forma, su tamaño e incluso el número de sus dimensiones, también cambia en la traducción. Para cualquier observador que utilice una teoría para pensar en el universo, el espacio-tiempo puede parecer real e indispensable. Pero si ese observador cambia la formulación de la teoría que utiliza a una versión equivalente y traducida, lo que una vez

pareció real e indispensable también cambia necesariamente. Así pues, si estas ideas son correctas -y debo subrayar que aún no han sido rigurosamente probadas, aunque los teóricos han acumulado una gran cantidad de pruebas de apoyo- ponen en entredicho la primacía del espacio y el tiempo.

De todas las pistas discutidas aquí, elegiría el principio holográfico como el que más probabilidades tiene de jugar un papel dominante en futuras investigaciones. Surge de una característica básica de los agujeros negros - su entropía - cuya comprensión, muchos físicos están de acuerdo, se basa en firmes fundamentos teóricos. Incluso si los detalles de nuestras teorías cambiaran, esperamos que cualquier descripción sensata de la gravedad permita la existencia de agujeros negros y, por lo tanto, los límites de entropía que impulsan este debate persistirán y se aplicará la holografía. Esa teoría de cuerdas incorpora naturalmente el principio holográfico, al menos en los ejemplos susceptibles de análisis matemático, es otra fuerte evidencia que sugiere la validez del principio. Espero que independientemente de dónde nos lleve la búsqueda de los fundamentos del espacio y el tiempo, independientemente de las modificaciones de la teoría de las cuerdas que nos puedan estar esperando, la holografía seguirá siendo un concepto guía.

Los componentes del espacio tiempo

A lo largo de este libro hemos aludido periódicamente a los componentes ultramicroscópicos del espacio tiempo, pero aunque hemos dado argumentos indirectos para su existencia, todavía no hemos dicho nada sobre lo que estos componentes podrían ser en realidad. Y por una buena razón. Realmente no tenemos ni idea de lo que son. O, tal vez debería decir, cuando se trata de identificar los ingredientes elementales del espacio tiempo, no tenemos ideas sobre los que estamos realmente seguros. Esta es una gran brecha en nuestra comprensión, pero vale la pena ver el problema en su contexto histórico.

Si se hubiera encuestado a los científicos a finales del siglo XIX sobre sus opiniones acerca de los componentes elementales de la materia, no se habría encontrado un acuerdo universal. Hace apenas un siglo, la hipótesis atómica era controvertida; había científicos muy conocidos -Ernst Mach era uno de ellos- que la consideraban errónea. Además, desde que la hipótesis atómica recibió una amplia aceptación a principios del siglo XX, los científicos han estado actualizando continuamente el cuadro que proporciona con lo que se cree que son ingredientes cada vez más elementales (por ejemplo, primero protones y neutrones, y luego quarks). La teoría de las cuerdas es el último paso en este camino, pero como todavía no ha sido confirmada experimentalmente (y aunque lo fuera, eso no impediría la existencia de una teoría aún más refinada en espera de ser

desarrollada), debemos reconocer abiertamente que la búsqueda de los componentes materiales básicos de la naturaleza continúa.

La incorporación del espacio y el tiempo en un contexto científico moderno se remonta a Newton en el siglo XVII, pero el pensamiento serio sobre su composición microscópica requirió los descubrimientos del siglo XX sobre la relatividad general y la mecánica cuántica. Por lo tanto, en escalas de tiempo históricas, en realidad apenas hemos comenzado a analizar el espacio tiempo, por lo que la falta de una propuesta definitiva para sus "átomos" -los constituyentes más elementales del espacio tiempo- no es una mancha negra en el tema. Ni mucho menos. Que hayamos llegado tan lejos, que hayamos revelado numerosas características del espacio y el tiempo más allá de la experiencia común, que hayamos protestado por un progreso insondable hace un siglo. La búsqueda de los ingredientes más fundamentales de la naturaleza, ya sea de la materia o del espacio tiempo, es un desafío formidable que probablemente nos ocupará durante algún tiempo.

Para el espacio tiempo, hay actualmente dos direcciones prometedoras en la búsqueda de componentes elementales. Una propuesta proviene de la teoría de las cuerdas y la otra de una teoría conocida como gravedad cuántica de bucle.

La propuesta de la teoría de cuerdas, dependiendo de lo que pienses, es intuitivamente agradable o completamente desconcertante. Ya que hablamos del "tejido" del espacio tiempo, la sugerencia es que tal vez el espacio tiempo se cose con cuerdas como se cose una camisa con hilo. Es decir, de la misma manera que la unión de numerosos hilos en un patrón apropiado produce el tejido de una camisa, tal vez la unión de numerosas cuerdas en un patrón apropiado produce lo que comúnmente llamamos el tejido del espacio-tiempo. La materia, como tú y yo, se convertiría entonces en aglomeraciones adicionales de cuerdas vibrantes, como la música sonora tocada sobre un estruendo apagado, o un patrón elaborado bordado en una pieza simple de material, que se mueve dentro del contexto cosido por las cuerdas del espacio tiempo.

Me parece una propuesta atractiva y convincente, pero hasta ahora nadie ha convertido estas palabras en una declaración matemática precisa. Hasta donde puedo decir, los obstáculos para hacerlo están lejos de ser insignificantes. Por ejemplo, si su camisa se desenredara completamente, se quedaría con un montón de hilo, un resultado que, dependiendo de las circunstancias, podría ser embarazoso o irritante, aunque probablemente no sea profundamente misterioso. Pero pone a prueba la mente (mi mente, al menos) para pensar en una situación análoga a la de las cuerdas: los hilos del espacio tiempo en esta propuesta. ¿Qué haríamos con un "montón" de cuerdas que se han desenredado del tejido del espacio tiempo o, quizás más concretamente, que aún no se han unido para producir el tejido del espacio tiempo? La tentación podría ser pensar en ellos como lo hacemos con el hilo de la camisa, como una materia prima que debe ser cosida,

pero que brilla por una sutileza absolutamente esencial. Nos imaginamos las cuerdas vibrando en el espacio y a través del tiempo, pero sin el tejido espacio-tiempo que las cuerdas se imaginan que ceden a través de su unión ordenada, *no hay espacio ni tiempo.* En esta propuesta, los conceptos de espacio y tiempo no tienen sentido hasta que innumerables cuerdas se entrelazan para producirlos.

Por lo tanto, para dar sentido a esta propuesta, necesitaríamos un marco para describir las cuerdas que no asuma desde el principio que están vibrando en un espacio tiempo preexistente. Necesitaríamos una formulación totalmente espaciada y atemporal de la teoría de las cuerdas, en la que el espacio tiempo emerja del comportamiento colectivo de las cuerdas.

Aunque se ha avanzado hacia este objetivo, nadie ha llegado todavía a una formulación tan espaciada e intemporal de la teoría de las cuerdas -algo que los físicos llaman una formulación *independiente de los antecedentes* (el término proviene de la noción poco precisa de que el espacio tiempo es un telón de fondo en el que tienen lugar los fenómenos físicos). En cambio, esencialmente todos los enfoques prevén que las cuerdas se mueven y vibran a través de un espaciotiempo que se inserta en la teoría "a mano"; el espaciotiempo no surge de la teoría, como los físicos imaginan que sucedería en un marco independiente de los antecedentes, sino que es suministrado a la teoría por el teórico. Muchos investigadores consideran que el desarrollo de una formulación independiente de los antecedentes es el mayor problema no resuelto de la teoría de las cuerdas. No sólo daría una idea del origen del espacio tiempo, sino que un marco independiente del fondo probablemente sería decisivo para resolver el principal escollo que se encuentra al final del capítulo 12, a saber, la incapacidad actual de la teoría para seleccionar la forma geométrica de las dimensiones adicionales. Una vez que su formalismo matemático básico se desenmarañe de cualquier espaciotiempo en particular, según el razonamiento, la teoría de cuerdas debería tener la capacidad de estudiar todas las posibilidades y tal vez adjudicar entre ellas.

Otra dificultad que enfrenta la propuesta de las cuerdas como hilos del espacio tiempo es que, como aprendimos en el capítulo 13, la teoría de las cuerdas tiene otros ingredientes además de las cuerdas. ¿Qué papel juegan estos otros componentes en la composición fundamental del espacio-tiempo? Esta pregunta se pone especialmente de relieve en el escenario del mundo de las cuerdas. Si el espacio tridimensional que experimentamos es una triple rama, ¿la rama en sí misma es indecomposible o está hecha a partir de la combinación de los otros ingredientes de la teoría? ¿Las branas, por ejemplo, están hechas de cuerdas, o las branas y las cuerdas son ambas elementales? ¿O deberíamos considerar otra posibilidad, que las salvas y las cuerdas podrían estar hechas de algunos ingredientes aún más finos? Estas preguntas están en la vanguardia de la investigación actual, pero como este capítulo final es sobre pistas y consejos, permítanme señalar una visión relevante que ha atraído mucha atención.

Antes, hablamos de las diversas branas que se encuentran en la cuerda/M-TEORIA: una brana, dos branas, tres branas, cuatro branas, y así sucesivamente. Aunque no lo subrayé antes, la teoría también contiene cero *branas,* ingredientes que no tienen extensión espacial, como las partículas puntuales. Esto podría parecer contrario a todo el espíritu de la teoría de las cuerdas, que se alejó del marco de las partículas puntuales en un esfuerzo por domar las salvajes ondulaciones de la gravedad cuántica. Sin embargo, las bridas cero, al igual que sus primos de dimensiones superiores en la figura 13.2, vienen con cuerdas, literalmente, y por lo tanto sus interacciones están gobernadas por cuerdas. No es sorprendente, pues, que las bridas cero se comporten de forma muy diferente a las partículas puntuales convencionales y, lo que es más importante, participan plenamente en la propagación y disminución de los nervios ultramicroscópicos del espacio tiempo; las bridas cero no reintroducen los fatales defectos que afectan a los esquemas de las partículas puntuales que intentan fusionar la mecánica cuántica y la relatividad general.

De hecho, Tom Banks de la Universidad de Rutgers y Willy Fischler de la Universidad de Texas en Austin, junto con Leonard Susskind y Stephen Shenker, ambos ahora en Stanford, han formulado una versión de la teoría de las cuerdas/M en la que las bridas cero son *los* ingredientes fundamentales que pueden combinarse para generar cuerdas y las otras branas de mayor dimensión. Esta propuesta, conocida como *Teoría de la* Matriz *-otro* posible significado de la "M" en la "Teoría M"- ha generado una avalancha de investigaciones de seguimiento, pero las difíciles matemáticas implicadas han impedido hasta ahora a los científicos llevar a término el enfoque. No obstante, los cálculos que los físicos han logrado realizar en este marco parecen apoyar la propuesta. Si la teoría de la Matriz es cierta, podría significar que todo -cadenas, branas y tal vez incluso el espacio y el tiempo mismos- está compuesto de agregados apropiados de cero branas. Es una perspectiva emocionante, y los investigadores son cautelosamente optimistas de que el progreso en los próximos años arrojará mucha luz sobre su validez.

Hasta ahora hemos estudiado el camino que los teóricos de las cuerdas han seguido en la búsqueda de los ingredientes del espacio tiempo, pero como he mencionado, hay un segundo camino que viene del principal competidor de la teoría de las cuerdas, la gravedad cuántica en bucle. La gravedad cuántica de bucle data de mediados de los años 80 y es otra propuesta prometedora para fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica. No intentaré hacer una descripción detallada (si estás interesado, echa un vistazo al excelente libro de Lee Smolin *Three Roads to Quantum Gravity*), pero en su lugar mencionaré algunos puntos clave que son particularmente esclarecedores para nuestra discusión actual.

La teoría de cuerdas y la gravedad cuántica de bucles afirman haber logrado el objetivo largamente buscado de proporcionar una teoría cuántica de la gravedad,

pero lo hacen de maneras muy diferentes. La teoría de las cuerdas surgió de la exitosa tradición de la física de partículas que durante décadas ha buscado los ingredientes elementales de la materia; para la mayoría de los primeros investigadores de cuerdas, la gravedad era una preocupación distante y secundaria, en el mejor de los casos. Por el contrario, la gravedad cuántica de bucles surgió de una tradición estrechamente basada en la teoría general de la relatividad; para la mayoría de los practicantes de este enfoque, la gravedad siempre ha sido el foco principal. Una comparación de una frase sostendría que los teóricos de cuerdas empiezan con lo pequeño (teoría cuántica) y se mueven para abrazar lo grande (gravedad), mientras que los partidarios de la gravedad cuántica de bucles empiezan con lo grande (gravedad) y se mueven para abrazar lo pequeño (teoría cuántica).[9] De hecho, como vimos en el capítulo 12, la teoría de cuerdas se desarrolló inicialmente como una teoría cuántica de la fuerza nuclear fuerte que opera dentro de los núcleos atómicos; sólo más tarde, por casualidad, se dio cuenta de que la teoría incluía en realidad la gravedad. La gravedad cuántica de bucle, por otro lado, toma la relatividad general de Einstein como punto de partida y busca incorporar la mecánica cuántica.

Este comienzo en extremos opuestos del espectro se refleja en las formas en que las dos teorías se han desarrollado hasta ahora. Hasta cierto punto, los principales logros de cada una de ellas demuestran ser los fallos de la otra. Por ejemplo, la teoría de las cuerdas fusiona todas las fuerzas y toda la materia, incluida la gravedad (una unificación completa que elude el enfoque del bucle), describiéndolo todo en el lenguaje de las cuerdas vibratorias. La partícula de gravedad, el gravitón, no es más que un patrón vibratorio de cuerda particular, y por lo tanto la teoría describe naturalmente cómo estos haces elementales de gravedad se mueven e interactúan mecánicamente cuánticos. Sin embargo, como acabamos de señalar, el principal fallo de las actuales formulaciones de la teoría de cuerdas es que presuponen un espacio tiempo de fondo dentro del cual las cuerdas se mueven y vibran. Por el contrario, el principal logro de la gravedad cuántica de bucle, que es impresionante, es que *no presupone* un espacio tiempo de fondo. La gravedad cuántica de bucle es un marco independiente de fondo. Sin embargo, extraer el espacio y el tiempo ordinario, así como las características familiares y exitosas de la relatividad general cuando se aplica a grandes escalas de distancia (algo que se hace fácilmente con las actuales formulaciones de la teoría de las cuerdas) de este punto de partida extraordinariamente desconocido del espacio y el tiempo, es un problema nada trivial, que los investigadores siguen tratando de resolver. Además, en comparación con la teoría de cuerdas, la gravedad cuántica de bucles ha avanzado mucho menos en la comprensión de la dinámica de los gravitones.

Una posibilidad armoniosa es que los entusiastas de las cuerdas y los aficionados a la gravedad cuántica en bucle estén construyendo la misma teoría, pero desde puntos de partida muy diferentes. Que cada teoría implique bucles, en la teoría de las cuerdas, estos son bucles de cuerda; en la gravedad cuántica de bucles, son

más difíciles de describir no matemáticamente, pero, a grandes rasgos, son bucles elementales de sugestiones espaciales que podrían estar conectados. Esta posibilidad se apoya además en el hecho de que en los pocos problemas accesibles para ambos, como la entropía de los agujeros negros, las dos teorías coinciden plenamente. [10] Y, sobre la cuestión de los constituyentes del espacio tiempo, ambas teorías sugieren que existe algún tipo de estructura atomizada. Ya hemos visto las pistas que apuntan a esta conclusión que surgen de la teoría de las cuerdas; las que provienen de la gravedad cuántica de bucles son convincentes y aún más explícitas. Los investigadores de bucles han demostrado que numerosos bucles en la gravedad cuántica de bucles pueden entrelazarse, algo así como pequeños bucles de lana tejidos a crochet en un jersey, y producir estructuras que parecen, a mayor escala, aproximarse a regiones del espacio tiempo. Lo más convincente de todo es que los investigadores de bucles han calculado las áreas permitidas de tales superficies del espacio. Y así como se puede tener un electrón o dos electrones o 202 electrones, pero no se puede tener 1,6 electrones o cualquier otra fracción, los cálculos muestran que las superficies pueden tener áreas que son de una longitud de Planck cuadrada, o dos longitudes de Planck cuadradas, o 202 longitudes de Planck cuadradas, pero no hay fracciones posibles. Una vez más, esta es una fuerte pista teórica de que el espacio, como los electrones, viene en trozos discretos e indivisibles.[11]

Si tuviera que arriesgarme a hacer una conjetura sobre los futuros desarrollos, me imagino que las técnicas independientes de fondo desarrolladas por la comunidad de la gravedad cuántica de bucles se adaptarán a la teoría de cuerdas, preparando el camino para una formulación de cuerdas que sea independiente de fondo. Y esa es la chispa, sospecho, que encenderá una tercera revolución de supercuerdas en la que, soy optimista, muchos de los misterios profundos restantes serán resueltos. Tales desarrollos probablemente también darán un giro completo a la larga historia del espacio tiempo. En los capítulos anteriores, seguimos el péndulo de la opinión al oscilar entre las posiciones relativistas y absolutistas sobre el espacio, el tiempo y el espacio-tiempo. Preguntamos: ¿Es el espacio algo, o no lo es? ¿Es el espacio tiempo un algo, o no lo es? Y, en el transcurso de unos pocos siglos de pensamiento, nos encontramos con diferentes puntos de vista. Creo que una unión experimentalmente confirmada e independiente de los antecedentes entre la relatividad general y la mecánica cuántica daría una solución gratificante a este problema. En virtud de la independencia de fondo, los ingredientes de la teoría podrían tener alguna relación entre sí, pero con la ausencia de un espacio-tiempo que se inserte en la teoría desde el principio, no habría ningún ámbito de fondo en el que ellos mismos estuvieran incrustados. Sólo importarían las relaciones relativas, una solución muy en el espíritu de relacionistas como Leibniz y Mach. Luego, a medida que los ingredientes de la teoría -ya sean cuerdas, branas, bucles o cualquier otra cosa descubierta en el curso de futuras investigaciones- se fusionaran para producir un espaciotiempo familiar a gran escala (ya sea nuestro espaciotiempo real o ejemplos hipotéticos útiles para los experimentos de pensamiento), su ser un

"algo" se recuperaría, al igual que en nuestra anterior discusión sobre la relatividad general: en un espaciotiempo por lo demás vacío, plano e infinito (uno de los ejemplos hipotéticos útiles), el agua del cubo giratorio de Newton adoptaría una forma cóncava. El punto esencial sería que la distinción entre el espacio tiempo y las entidades materiales más tangibles se evaporaría en gran medida, ya que ambas emergerían de agregados apropiados de ingredientes más básicos en una teoría que es fundamentalmente relacional, sin espacio y sin tiempo. Si así resulta, Leibniz, Newton, Mach y Einstein podrían reclamar una parte de la victoria.

Espacio interior y exterior

Especular sobre el futuro de la ciencia es un ejercicio entretenido y constructivo. Coloca nuestros emprendimientos actuales en un contexto más amplio, y enfatiza los objetivos generales hacia los cuales estamos trabajando lenta y deliberadamente. Pero cuando tal especulación se dirige al futuro del propio espacio tiempo, adquiere una cualidad casi mística: estamos considerando el destino de las mismas cosas que dominan nuestro sentido de la realidad. Una vez más, no hay duda de que independientemente de los futuros descubrimientos, el espacio y el tiempo continuarán enmarcando nuestra experiencia individual; el espacio y el tiempo, en lo que respecta a la vida cotidiana, están aquí para quedarse. Lo que seguirá cambiando, y probablemente cambie drásticamente, es nuestra comprensión del marco que proporcionan, el escenario, es decir, de la realidad experiencial. Después de siglos de pensamiento, todavía podemos retratar el espacio y el tiempo como el más familiar de los extraños. Se abren paso descaradamente en nuestras vidas, pero hábilmente ocultan su composición fundamental de las mismas percepciones que informan e influyen tan plenamente.

Durante el último siglo, nos hemos familiarizado íntimamente con algunas características previamente ocultas del espacio y el tiempo a través de las dos teorías de la relatividad de Einstein y a través de la mecánica cuántica. La ralentización del tiempo, la relatividad de la simultaneidad, los cortes alternativos del espacio-tiempo, la gravedad como deformación y curvatura del espacio y el tiempo, la naturaleza probabilística de la realidad y el entrelazamiento cuántico de largo alcance no estaban en la lista de cosas que incluso los mejores físicos del mundo del siglo XIX habrían esperado encontrar a la vuelta de la esquina. Y sin embargo ahí estaban, como lo atestiguan tanto los resultados experimentales como las explicaciones teóricas.

En nuestra época, nos hemos encontrado con nuestra propia panoplia de ideas inesperadas: Materia oscura y energía oscura que parecen ser, de lejos, los componentes dominantes del universo. Ondas gravitacionales - ondas en el tejido del espacio tiempo - que fueron predichas por la relatividad general de Einstein y que pueden algún día permitirnos retroceder más en el tiempo que nunca antes.

Un océano de Higgs, que impregna todo el espacio y que, si se confirma, nos ayudará a entender cómo las partículas adquieren masa. La expansión inflacionaria, que puede explicar la forma del cosmos, resolverá el rompecabezas de por qué es tan uniforme a gran escala, y fijará la dirección de la flecha del tiempo. La teoría de las cuerdas, que plantea bucles y fragmentos de energía en lugar de partículas puntuales y promete una versión audaz del sueño de Einstein en la que todas las partículas y todas las fuerzas se combinan en una sola teoría. Dimensiones espaciales adicionales, surgidas de las matemáticas de la teoría de las cuerdas, y posiblemente detectables en los experimentos de los aceleradores durante la próxima década. Un mundo de marca, en el que nuestras tres dimensiones espaciales pueden ser sólo un universo entre muchos, flotando en un espaciotiempo de dimensiones superiores. Y quizás incluso un espaciotiempo emergente, en el que el propio tejido del espacio y el tiempo está compuesto por entidades más fundamentales sin espacio ni tiempo.

Durante la próxima década, aceleradores cada vez más potentes proporcionarán la tan necesaria aportación experimental, y muchos físicos confían en que los datos recogidos de las colisiones altamente energéticas que se planean confirmarán una serie de estas construcciones teóricas fundamentales. Comparto este entusiasmo y espero ansiosamente los resultados. Hasta que nuestras teorías entren en contacto con fenómenos observables y comprobables, permanecerán en el limbo: seguirán siendo colecciones prometedoras de ideas que pueden o no tener relevancia para el mundo real. Los nuevos aceleradores harán avanzar sustancialmente el solapamiento entre la teoría y el experimento y, nosotros los físicos esperamos, llevarán muchas de estas ideas al reino de la ciencia establecida.

Pero hay otro enfoque que, aunque es más bien un tiro largo, me llena de incomparable asombro. En el capítulo 11 discutimos cómo los efectos de los pequeños nervios cuánticos pueden ser vistos en cualquier cielo nocturno claro, ya que son estirados enormemente por la expansión cósmica, resultando en cúmulos que siembran la formación de estrellas y galaxias. (Recordemos la analogía de pequeños garabatos, dibujados en un globo, que se estiran a través de su superficie cuando el globo se infla). Esta realización demuestra que da acceso a la física cuántica a través de observaciones astronómicas. Tal vez se puede empujar aún más lejos. Tal vez la expansión cósmica pueda estirar las huellas de procesos o características a escala aún más corta -la física de las cuerdas, o la gravedad cuántica en general, o la estructura atomizada del espacio tiempo ultramicroscópico en sí- y extender su influencia, de alguna manera sutil pero observable, a través de los cielos. Tal vez, es decir, el universo ya ha sacado las fibras microscópicas del tejido del cosmos y las ha desplegado claramente a través del cielo, y todo lo que necesitamos hacer es aprender a reconocer el patrón.

La evaluación de propuestas de vanguardia para leyes físicas profundas bien podría requerir el feroz poder de los aceleradores de partículas capaces de recrear condiciones violentas no vistas desde momentos después del big bang. Pero para mí, no habría nada más poético, ningún resultado más elegante, ninguna unificación más completa, que confirmar nuestras teorías de los ultrasmales - nuestras teorías sobre la composición ultramicroscópica del espacio, el tiempo y la materia- girando nuestros telescopios más poderosos hacia el cielo y mirando silenciosamente a las estrellas.

Notas finales

1 Los términos fuerza *centrífuga* y *centrípeta* se utilizan a veces para describir el movimiento de giro. Pero son simplemente etiquetas. Nuestra intención es entender por qué el movimiento giratorio da lugar a la fuerza.

2 Hay un debate sobre las opiniones precisas de Mach sobre el material que sigue. Algunos de sus escritos son un poco ambiguos y algunas de las ideas que se le atribuyen surgieron de interpretaciones posteriores de su trabajo. Dado que parece haber sido consciente de estas interpretaciones y nunca ofreció correcciones, algunos han sugerido que estaba de acuerdo con sus conclusiones. Pero la exactitud histórica podría ser mejor servida si cada vez que escribo "Mach argumentó" o "las ideas de Mach", se lee que significa "la interpretación prevaleciente de un enfoque iniciado por Mach".

3 Aunque me gustan los ejemplos humanos porque establecen una conexión inmediata entre la física de la que hablamos y las sensaciones innatas, un inconveniente es nuestra capacidad de mover, voluntariamente, una parte de nuestro cuerpo en relación con otra, en efecto, utilizar una parte de nuestro cuerpo como punto de referencia para el movimiento de otra parte (como alguien que gira uno de sus brazos en relación con su cabeza). Hago hincapié en el movimiento giratorio *uniforme* - movimiento giratorio en el que todas las partes del cuerpo giran juntas - para evitar tales complicaciones irrelevantes. Por lo tanto, cuando hablo del movimiento giratorio de tu cuerpo, imagina que, como las dos rocas de Newton atadas por una cuerda o un patinador en los momentos finales de una rutina olímpica, cada parte del cuerpo gira al mismo ritmo que las demás.

4 Como las páginas de cualquier libro de visitas, las páginas de la figura 3.3 sólo muestran momentos representativos del tiempo. Esto puede sugerirle la interesante cuestión de si el tiempo es discreto o infinitamente divisible. Volveremos a esa pregunta más tarde, pero por ahora imaginemos que el tiempo

es infinitamente divisible, por lo que nuestro libro de visitas debería tener un número infinito de páginas que interpolen entre las mostradas.

5 Es más fácil imaginar el espacio deformado, pero debido a su íntima conexión, el tiempo también está deformado por la materia y la energía. Y así como una deformación en el espacio significa que el espacio se estira o se comprime, como en la figura 3.10, una deformación en el tiempo significa que el tiempo se estira o se comprime. Es decir, los relojes que experimentan diferentes tirones gravitatorios -como uno en el sol y otro en el espacio profundo y vacío- se estiran en el tiempo a ritmos diferentes. De hecho, resulta que la deformación del espacio causada por cuerpos ordinarios como la Tierra y el Sol (en contraposición a los agujeros negros) es mucho menos pronunciada que la deformación que infligen al tiempo.[15]

6 En la relatividad especial -el caso especial de la relatividad general en la que el campo gravitatorio es nulo- esta idea se aplica sin cambios: un campo gravitatorio nulo sigue siendo un campo que puede medirse y cambiarse, y por lo tanto proporciona un algo relativo a lo que puede definirse la aceleración.

7 Para evitar complicaciones lingüísticas, describo los giros de los electrones como perfectamente correlacionados, aunque la descripción más convencional es una en la que están perfectamente *anti correlacionados*: cualquiera que sea el resultado que un detector encuentre, el otro encontrará lo opuesto. Para comparar con la descripción convencional, imagínese que he intercambiado todas las etiquetas en el sentido de las agujas del reloj y en sentido contrario en uno de los detectores.

8 Muchos investigadores, incluyéndome a mí, creen que el argumento de Bell y el experimento de Aspect establecen de manera convincente que las correlaciones observadas entre partículas ampliamente separadas no pueden ser explicadas por el razonamiento de tipo Scully que atribuye las correlaciones a nada más sorprendente que el hecho de que las partículas hayan adquirido propiedades definidas y correlacionadas cuando estaban (previamente) juntas. Otros han tratado de evadir o disminuir la sorprendente conclusión de no localidad a la que esto nos ha llevado. No comparto su escepticismo, pero en la sección de notas se citan algunas obras para lectores en general que tratan algunas de estas alternativas.15

9 Escoge cualquier punto del pan. Dibuja una rebanada que incluya el punto, y que intercepte nuestra rebanada actual en un ángulo que sea menor a 45 grados. Este trozo representará el trozo de ahora *-realidad-* de un observador distante que inicialmente estaba en reposo en relación con nosotros, como Chewie, pero que ahora se mueve en relación con nosotros a menos de la velocidad de la luz. Por diseño, este trozo incluye el punto (arbitrario) en el pan que casualmente escogiste.[4]

10 Hay una excepción a esta afirmación que tiene que ver con una cierta clase de partículas exóticas. En lo que respecta a las cuestiones tratadas en este capítulo, considero que esto probablemente sea de poca relevancia y por lo tanto no mencionaré más esta calificación. Si le interesa, se discute brevemente en la nota 2.

11 Nótese que la simetría de inversión del tiempo no se trata de que el tiempo mismo se invierta o "corra" hacia atrás. En su lugar, como hemos descrito, la simetría de inversión del tiempo se refiere a si los eventos que ocurren *en el* tiempo, en un orden temporal particular, también pueden ocurrir en el orden inverso. Una frase más apropiada podría ser la inversión del *evento* o la inversión del *proceso* o la inversión del orden del *evento,* pero nos quedaremos con el término convencional.

12 La entropía es otro ejemplo en el que la terminología complica las ideas. No se preocupe si tiene que recordarse a sí mismo repetidamente que *una baja* entropía significa *un alto orden* y que una *alta* entropía significa *un bajo* orden (equivalente a un alto desorden). A menudo tengo que hacerlo.

13 Recuerden, en las páginas 152-53 mostramos la enorme diferencia entre el número de configuraciones ordenadas y desordenadas para sólo 693 hojas de papel de doble cara. Ahora estamos discutiendo el comportamiento de aproximadamente 10 moléculas de ^{24} H_2O, por lo que la diferencia entre el número de configuraciones ordenadas y desordenadas es impresionantemente monumental. Además, el mismo razonamiento se aplica a todos los demás átomos y moléculas dentro de ti y del entorno (cerebros, cámaras de seguridad, moléculas de aire, etc.). Es decir, en la explicación estándar en la que puedes confiar en tus recuerdos, no sólo habrían comenzado los cubos de hielo parcialmente derretidos, a las 10 p.m., en un estado más ordenado -menos probable-, sino que también lo haría todo lo demás: cuando una cámara de vídeo graba una secuencia de eventos, hay un aumento neto de entropía (por el calor y el ruido liberados por el proceso de grabación); de manera similar, cuando un cerebro graba un recuerdo, aunque entendemos los detalles microscópicos con menos precisión, hay un aumento neto de entropía (el cerebro puede ganar orden pero, como en cualquier proceso que produzca orden, si tenemos en cuenta el calor generado, hay un aumento neto de entropía). Así, si comparamos la entropía total en el bar entre las 10 p.m. y las 10:30 p.m. en los dos escenarios -uno en el que se confía en los recuerdos, y el otro en el que las cosas se organizan espontáneamente desde un estado inicial de desorden para ser consistentes con lo que se ve, ahora, a las 10:30 p.m.- hay una enorme diferencia de entropía. El último escenario, en cada paso del camino, tiene una entropía mucho mayor que el primero, y por lo tanto, desde el punto de vista de la probabilidad, es enormemente más probable.

14 Un punto estrechamente relacionado es que si nos convenciéramos de que el mundo que vemos ahora mismo acaba de salir de un desorden total, el mismo

razonamiento exacto -invocado en cualquier momento posterior- nos obligaría a abandonar nuestra creencia actual y, en su lugar, atribuir el mundo ordenado a una fluctuación aún más reciente. Así, en esta forma de pensar, cada momento siguiente invalida las creencias mantenidas en cada momento anterior, una forma claramente poco convincente de explicar el cosmos.

15 Es decir, un agujero negro de un tamaño determinado contiene más entropía que *cualquier* otra cosa del mismo tamaño.

16 Aunque el enfoque de la suma de historias de Feynman podría parecer que hace que el aspecto de la partícula sea prominente, es sólo una interpretación particular de las *ondas* de probabilidad (ya que implica muchas historias para una sola partícula, cada una de las cuales hace su propia contribución probabilística), y por lo tanto está subsumida por el lado ondulatorio de la complementariedad. Cuando hablamos de algo que se comporta como una partícula, siempre nos referimos a una partícula convencional que viaja a lo largo de una y sólo una trayectoria.

17 Si esta sección le parece difícil, puede pasar con seguridad a la siguiente sección sin perder la continuidad. Pero os animo a que intentéis superarla, ya que los resultados son realmente estupendos.

18 La mecánica cuántica, con razón, tiene la reputación de ser todo menos suave y gradual; más bien, como veremos explícitamente en capítulos posteriores, revela un microcosmos turbulento y tembloroso. El origen de este temblor es la naturaleza probabilística de la función de onda -aunque las cosas pueden ser de una sola manera en un momento dado, existe la probabilidad de que sean significativamente diferentes un momento después- *y no* una cualidad siempre temblorosa de la propia función de onda.

19 Ir más allá de la metáfora bidimensional de la superficie de un globo y tener un modelo tridimensional esférico es fácil matemáticamente pero difícil de imaginar, incluso para los matemáticos y físicos profesionales. Podrías estar tentado de pensar en una bola sólida y tridimensional, como una bola de bolos sin los agujeros para los dedos. Sin embargo, esta no es una forma aceptable. Queremos que todos los puntos del modelo estén en un pie de igualdad, ya que creemos que cada lugar del universo es (en promedio) como cualquier otro. Pero la bola de bolos tiene todo tipo de puntos diferentes: algunos están en la superficie exterior, otros están incrustados en el interior, uno está justo en el centro. En cambio, al igual que la superficie bidimensional de un globo rodea una región esférica *tridimensional* (que contiene el aire del globo), una forma redonda tridimensional aceptable tendría que rodear una región esférica de *cuatro* dimensiones. Así que la superficie esférica tridimensional de un globo en un espacio cuatridimensional es una forma aceptable. Pero si eso te deja buscando una imagen a tientas, haz lo que hacen casi todos los profesionales: ceñirte a las analogías de dimensiones

inferiores fáciles de visualizar. Captan casi todos los rasgos esenciales. Un poco más adelante, consideramos el espacio plano tridimensional, en oposición a la forma redonda de una esfera, y ese espacio plano puede ser visualizado.

20 Dependiendo de si la velocidad de la expansión del universo se está acelerando o ralentizando con el tiempo, la luz emitida por tales galaxias puede librar una batalla que habría enorgullecido a Zeno: la luz puede fluir hacia nosotros a la velocidad de la luz mientras que la expansión del espacio hace que la distancia que la luz aún tiene que cubrir sea cada vez mayor, impidiendo que la luz nos alcance. Ver la sección de notas para más detalles.10

21 Así como la pantalla del videojuego da una versión de tamaño finito del espacio plano que no tiene bordes o límites, hay versiones de tamaño finito de la forma de la silla de montar que tampoco tienen bordes o límites. No discutiré más sobre esto, salvo para señalar que implica que las tres posibles curvaturas (positiva, cero, negativa) pueden ser realizadas por formas de tamaño finito sin bordes o límites. (En principio, entonces, un Magallanes espacial podría llevar a cabo una versión cósmica de su viaje en un universo cuya curvatura viene dada por cualquiera de las tres posibilidades).

22 Hoy en día, la materia en el universo es más abundante que la radiación, por lo que es conveniente expresar la densidad crítica en las unidades más relevantes para los gramos de masa por metro cúbico. Obsérvese también que mientras que 10^{-23} gramos por metro cúbico podría no parecer mucho, hay muchos metros cúbicos de espacio ahí fuera en el cosmos. Además, cuanto más atrás en el tiempo se mira, más pequeño es el espacio en el que la masa/energía es comprimida, por lo que el universo se vuelve más denso.

23 Aunque una disminución de la simetría significa que menos manipulaciones pasan desapercibidas, el calor liberado al medio ambiente durante estas transformaciones asegura que la entropía general -incluida la del medio ambiente- siga aumentando.

24 La terminología no es particularmente importante, pero brevemente, aquí es de donde viene. El valle de la figura 9.1c y 9.1d tiene una forma simétrica -es circular- con cada punto a la par con los demás (cada punto denota un valor del campo de Higgs de la menor energía posible). Sin embargo, cuando el valor del campo de Higgs se desliza por el cuenco, aterriza en *un* punto concreto del valle circular, y al hacerlo "espontáneamente" selecciona un lugar del valle como especial. A su vez, los puntos del valle ya no están todos en igualdad de condiciones, ya que se ha elegido uno, y así el campo de Higgs interrumpe o "rompe" la simetría anterior entre ellos. Así, poniendo las palabras juntas, el proceso en el que el Higgs se desliza hacia abajo a un valor particular no cero en el valle se llama ruptura *de simetría espontánea.* Más adelante en el texto, describiremos aspectos más

tangibles de la reducción de la simetría asociada con tal formación de un océano de Higgs. [7]

25 Se podría pensar que he dejado fuera una "i" en la última sílaba de "inflado", pero no es así; los físicos a menudo dan nombres de campos, como fotón y gluón, que terminan con "on".

26 A medida que el universo se expande, la pérdida de energía de los fotones puede observarse directamente porque sus longitudes de onda se estiran -sufren un desplazamiento *al rojo*- y cuanto más larga es la longitud de onda de un fotón, menos energía tiene. Los fotones de fondo de microondas han sufrido tal desplazamiento al rojo durante casi 14.000 millones de años, lo que explica sus largas longitudes de onda de microondas y su baja temperatura. La materia sufre una pérdida similar de su energía cinética (energía del movimiento de las partículas), pero la energía total ligada a la masa de las partículas (su *energía de reposo* - la energía equivalente a su masa, cuando están en reposo) permanece constante.

27 Aunque es útil, la analogía de la banda de goma no es perfecta. La presión negativa ejercida por las bandas de goma impide la expansión de la caja, mientras que la presión negativa del inflado impulsa la expansión del espacio. Esta importante diferencia ilustra la aclaración enfatizada en la página 278: en cosmología, no es que la presión negativa uniforme impulse la expansión (sólo las diferencias de presión dan lugar a fuerzas, por lo que la presión uniforme, ya sea positiva o negativa, *no* ejerce ninguna fuerza). Más bien, la presión, como la masa, da lugar a una fuerza gravitatoria. Y la presión negativa da lugar a una fuerza gravitatoria repulsiva que impulsa la expansión. Esto no afecta a nuestras conclusiones.

28 Algunos investigadores, incluyendo a Alan Guth y Eddie Farhi, han investigado si uno podría, hipotéticamente, crear un nuevo universo en el laboratorio sintetizando una pepita de campo inflado. Más allá del hecho de que aún no tenemos una verificación experimental directa de que exista tal cosa como un campo de inflado, nótese que las veinte libras de campo de inflado tendrían que estar apiñadas en un espacio diminuto, aproximadamente de 10 $^{\text{a 26 centímetros de}}$ lado, y por lo tanto la densidad sería enorme -algunas 10 a ^{67} veces la densidad de un núcleo atómico- mucho más allá de lo que podemos producir, ahora o quizás nunca.

29 No te confundas aquí: El estiramiento inflacionario de los nervios cuánticos discutidos en la última sección aún produjo una minúscula e inevitable falta de uniformidad de alrededor de 1 parte en 100.000. Pero esa minúscula no uniformidad se superponía a un universo por lo demás liso. Ahora estamos describiendo cómo esta última, la uniformidad suave subyacente, llegó a ser.

30 Para facilitar la escritura, consideraremos sólo los campos que alcanzan su energía más baja cuando sus valores son cero. La discusión para otros campos - campo de Higgs- es idéntica, excepto que los nervios fluctúan sobre el valor de energía más bajo *no cero del* campo. Si se siente tentado a decir que una región del espacio está vacía sólo si no hay materia presente y todos los campos están ausentes*, y no* sólo que tienen el valor cero, véase la sección de notas. [2]

31 El resto de este capítulo relata el descubrimiento de la teoría de las supercuerdas y discute las ideas esenciales de la teoría con respecto a la unificación y la estructura del espacio tiempo. Los lectores de *El Universo Elegante* (especialmente los capítulos 6 a 8) estarán familiarizados con gran parte de este material, y deberían sentirse libres de hojear este capítulo y pasar al siguiente.

32 Recuerden, como se señaló en el capítulo 9, incluso un imán débil puede dominar la atracción de toda la gravedad de la Tierra y recoger un sujetapapeles. Numéricamente, la fuerza gravitatoria tiene unas $10^{a\ 42}$ veces la fuerza de la fuerza electromagnética.

33 Debo señalar que los defensores de otro enfoque para fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica, la *gravedad cuántica en bucle,* que se examinará brevemente en el capítulo 16, adoptan un punto de vista que se acerca más a la conjetura anterior: que el espacio tiempo tiene una estructura discreta en la más pequeña de las escalas.

34 La relación con la masa que surge de un océano de Higgs se examinará más adelante en el capítulo.

35 Si se contara la izquierda, la derecha, el sentido de las agujas del reloj y el sentido contrario a las agujas del reloj por separado, se concluiría que el gusano puede moverse en cuatro direcciones. Pero cuando hablamos de direcciones "independientes", siempre agrupamos las que se encuentran a lo largo del mismo eje geométrico, como la izquierda y la derecha, y también en sentido horario y antihorario.

36 Permítanme prepararlos para un desarrollo relevante que encontraremos en el próximo capítulo. Los teóricos de cuerdas han sabido durante décadas que las ecuaciones que generalmente utilizan para analizar matemáticamente la teoría de cuerdas son aproximadas (las ecuaciones exactas han demostrado ser difíciles de identificar y comprender). Sin embargo, la mayoría pensó que las ecuaciones aproximadas eran lo suficientemente precisas para determinar el número requerido de dimensiones adicionales. Más recientemente (y para sorpresa de la mayoría de los físicos en este campo), algunos teóricos de cuerdas mostraron que las ecuaciones aproximadas *no incluían* una dimensión; ahora se acepta que la teoría necesita *siete dimensiones adicionales*. Como veremos, esto no

compromete el material discutido en este capítulo, sino que muestra que encaja dentro de un marco más amplio, de hecho más unificado. [20]

37 El nombre más preciso de estas entidades pegajosas es *Dirichlet-p-branes,* o *D-p-branes* para abreviar. Nos quedaremos con la *p-brana* más corta.

38 Hay incluso una propuesta, de Lisa Randall, de Harvard, y Raman Sundrum, de Johns Hopkins, en la que la gravedad también puede ser atrapada, no por una brana pegajosa, sino por dimensiones adicionales que se curvan de la manera correcta, relajando aún más las limitaciones de su tamaño.

39 Una de ellas es la proyectada Antena Espacial de Interferómetro Láser (LISA), una versión espacial del LIGO que comprende múltiples naves espaciales, separadas por millones de kilómetros, que desempeñan el papel de los tubos de cuatro kilómetros del LIGO. También hay otros detectores que están jugando un papel crítico en la búsqueda de ondas gravitacionales, incluyendo el detector germano-británico GEO600, el detector franco-italiano VIRGO, y el detector japonés TAMA300.

40 Dado que la teletransportación comienza con algo aquí y busca hacer que aparezca en un lugar distante, en esta sección hablaré a menudo como si las partículas tuvieran posiciones definidas. Para ser más preciso, siempre diré, "comenzando con una partícula que tiene una alta probabilidad de estar ubicada aquí" o "comenzando con una partícula con un 99 por ciento de probabilidad de estar ubicada aquí", con un lenguaje similar usado donde la partícula se teletransporta, pero por brevedad usaré el lenguaje más flojo.

41 En el caso de las colecciones de partículas -a diferencia de las partículas individuales- el estado cuántico también codifica la relación de cada partícula de la colección con las demás. Así que, al reproducir exactamente el estado cuántico de las partículas que componen el DeLorean, nos aseguramos de que todas ellas tengan la misma relación entre sí; el único cambio que experimentan es que su ubicación general se habría desplazado de Nueva York a Londres.

42 La fragilidad del cuerpo humano es otra limitación práctica: la aceleración necesaria para alcanzar velocidades tan altas en un período de tiempo razonable es mucho mayor de lo que el cuerpo puede soportar. Obsérvese también que la ralentización del tiempo da una estrategia, en principio, para alcanzar lugares distantes en el espacio. Si un cohete dejara la Tierra y se dirigiera a la galaxia de Andrómeda, viajando a un 99,9999999999999999 por ciento de la velocidad de la luz, tendríamos que esperar casi 6 millones de años para que volviera. Pero a esa velocidad, el tiempo en el cohete se ralentiza en relación con el tiempo en la Tierra tan dramáticamente que al regresar el astronauta habría envejecido sólo ocho horas (dejando de lado el hecho de que no podría haber sobrevivido a las aceleraciones para ponerse al día, dar la vuelta y finalmente detenerse).

43 Por supuesto, debería decir el 1 de enero de 1966, pero no nos preocupemos por eso.

44 Para detalles sobre la dualidad geométrica que involucra tanto círculos como formas de Calabi-Yau, ver *El Universo Elegante,* Capítulo 10.

45 Si eres reacio a reescribir a Platón, el escenario del braneworld da una versión de la holografía en la que las sombras se vuelven a poner en su lugar. Imagina que vivimos en una triple bruna que rodea una región con cuatro dimensiones espaciales (de la misma manera que la piel bidimensional de una manzana rodea el interior tridimensional de la manzana). El principio holográfico en este escenario diría que nuestras percepciones tridimensionales serían las sombras de la física cuatridimensional que tiene lugar en la región rodeada por nuestra brana.

Notas

Capítulo 1

1. Lord Kelvin fue citado por el físico Albert Michelson durante su discurso de 1894 en la dedicación del Laboratorio Ryerson de la Universidad de Chicago (véase D. Kleppner, *Physics Today,* noviembre de 1998).

2. Lord Kelvin, "Nubes del siglo XIX sobre la teoría dinámica del calor y la luz", *Phil. Mag.* II-6ª serie, 1 (1901).

3. A. Einstein, N. Rosen, y B. Podolsky, *Phys. Rev.* 47, 777 (1935).

4. Sir Arthur Eddington, *The Nature of the Physical World* (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1928).

5. Como se describe más detalladamente en la nota 2 del capítulo 6, se trata de una exageración porque hay ejemplos, relativos a partículas relativamente esotéricas (como los mazos K y B), que muestran que la llamada fuerza nuclear débil no trata el pasado y el futuro de manera totalmente simétrica. Sin embargo, en mi opinión y en la de muchos otros que han pensado en ello, dado que estas partículas no desempeñan esencialmente ningún papel en la determinación de las propiedades de los objetos materiales cotidianos, es poco probable que sean importantes para explicar el rompecabezas de la flecha del tiempo (aunque, me apresuro a añadir, nadie lo sabe con seguridad). Así pues, aunque técnicamente es una exageración, asumiré en todo momento que el error cometido al afirmar que las leyes tratan el pasado y el futuro en pie de igualdad es mínimo, al menos en lo que respecta a la explicación del rompecabezas de la flecha del tiempo.

6. Timothy Ferris, *Coming of Age in the Milky Way* (New York: Anchor, 1989).

Capítulo 2

1. Isaac Newton, *El principio matemático de la filosofía natural de Sir Isaac Newton y su sistema del mundo,* trans. A. Motte y Florian Cajori (Berkeley: University of California Press, 1934), vol. 1, pág. 10.

2. Ibídem, p. 6.

3. Ibíd.

4. Ibídem, pág. 12.

5. Albert Einstein, en el prólogo a Max Jammer, "Conceptos *del Espacio": The Histories of Theories of Space in Physics* (Nueva York: Dover, 1993).

6. A. Rupert Hall, *Isaac Newton, Adventurer in Thought* (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1992), pág. 27.

7. Ibíd.

8. H. G. Alexander, ed., *The Leibniz-Clarke Correspondence* (Manchester: Manchester University Press, 1956).

9. Me estoy centrando en Leibniz como representante de aquellos que se oponían a asignar al espacio una existencia independiente de los objetos que lo habitan, pero muchos otros también defendieron enérgicamente este punto de vista, entre ellos Christiaan Huygens y el obispo Berkeley.

10. Véase, por ejemplo, Max Jammer, pág. 116.

11. V. I. Lenin, Materialismo y Empiriocrítica: Critical Comments on a Reac *tionaryPhilosophy* (Nueva York: International Publications, 1909). Segunda edición inglesa de *Materializm' i Empiriokrititsizm': Kriticheskia Zametki ob' Odnoi Reaktsionnoi Filosofii* (Moscú: Zveno Press, 1909).

Capítulo 3

1. Para el lector con formación matemática, estas cuatro ecuaciones son

$$\nabla \cdot E = \rho/\varepsilon_0,\ \nabla \cdot B = 0,\ \nabla \times E + \partial B/\partial t = 0,\ \nabla \times B - \varepsilon_0\mu_0 \partial E/\partial t = \mu_0 J,$$

where $E, B, \rho, J, \varepsilon_0, \mu_0$

denotan el campo eléctrico, el campo magnético, la densidad de carga eléctrica, la densidad de corriente eléctrica, la permitividad del espacio libre y la permeabilidad del espacio libre, respectivamente. Como se puede ver, las ecuaciones de Maxwell relacionan la tasa de cambio de los campos electromagnéticos con la presencia de cargas y corrientes eléctricas. No es difícil demostrar que estas ecuaciones implican una velocidad para las ondas electromagnéticas dada por 1/sqrt 0 , que cuando se evalúa es de hecho la velocidad de la luz.

2. Hay cierta controversia en cuanto al papel que tales experimentos jugaron en el desarrollo de la relatividad especial de Einstein. En su biografía de Einstein, *"Sutil es el Señor": The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982), págs. 115 a 19, Abraham Pais ha argumentado, utilizando las propias declaraciones de Einstein de sus últimos años, que Einstein conocía los resultados de Michelson-Morley. Albrecht Fölsing en *Albert Einstein: A Biography* (Nueva York: Viking, 1997), págs. 217 a 20, también sostiene que Einstein conocía el resultado de Michelson-Morley, así como anteriores resultados experimentales

nulos en la búsqueda de pruebas del éter, como la obra de Armand Fizeau. Pero Fölsing y muchos otros historiadores de la ciencia también han argumentado que tales experimentos jugaron, en el mejor de los casos, un papel secundario en el pensamiento de Einstein. Einstein se guió principalmente por consideraciones de simetría matemática, simplicidad y una intuición física extraña.

3. Para que veamos algo, la luz tiene que viajar a nuestros ojos; de la misma manera, para que veamos la luz, la luz misma tendría que hacer el mismo viaje. Así que, cuando hablo de que Bart ve la luz que se aleja rápidamente, es una abreviación. Me imagino que Bart tiene un pequeño ejército de ayudantes, todos moviéndose a la velocidad de Bart, pero situados a varias distancias a lo largo del camino que él y el rayo de luz siguen. Estos ayudantes le dan a Bart actualizaciones sobre la distancia que la luz ha acelerado y el momento en que la luz llegó a lugares tan distantes. Entonces, en base a esta información, Bart puede calcular cuán rápido se aleja la luz de él.

4. Hay muchas derivaciones matemáticas elementales de las ideas de Einstein sobre el espacio y el tiempo que surgen de la relatividad especial. Si estás interesado, puedes, por ejemplo, echar un vistazo al Capítulo 2 de *El Universo Elegante* (junto con los detalles matemáticos que se dan en las notas finales de ese capítulo). Un relato más técnico pero extremadamente lúcido es el de Edwin Taylor y John Archibald Wheeler, *Física Espacio-Tiempo: Introduction to Special Relativity* (Nueva York, W. H. Freeman & Co., 1992).

5. La detención del tiempo a la velocidad de la luz es una noción interesante, pero es importante no leer demasiado en ella. La relatividad especial muestra que ningún objeto material puede alcanzar la velocidad de la luz: cuanto más rápido viaja un objeto material, más duro tendríamos que empujarlo para aumentar su velocidad. Apenas a la velocidad de la luz, tendríamos que darle al objeto un empujón esencialmente infinitamente duro para que vaya más rápido, y eso es algo que nunca podremos hacer. Así pues, la perspectiva "intemporal" del fotón se limita a los objetos *sin masa* (de los que el fotón es un ejemplo), y por lo tanto la "intemporalidad" está permanentemente más allá de lo que todos los tipos de especies de partículas, salvo unos pocos, pueden llegar a alcanzar. Si bien es un ejercicio interesante y fructífero imaginar cómo aparecería el universo cuando se mueve a la velocidad de la luz, en última instancia necesitamos centrarnos en las perspectivas que pueden alcanzar los objetos materiales, como nosotros mismos, si queremos sacar conclusiones sobre cómo la relatividad especial afecta a nuestra concepción experimental del tiempo.

6. Ver Abraham Pais, *Sutil es el Señor, pp*. 113-14.

7. Para ser más precisos, *definimos que* el agua gira si toma una forma cóncava, y no gira si no lo hace. Desde una perspectiva machiana, en un universo vacío no existe la concepción del giro, por lo que la superficie del agua siempre sería plana

(o, para evitar problemas de falta de gravedad tirando del agua, podemos decir que la tensión de la cuerda atada entre dos rocas siempre será floja). La afirmación aquí es que, por el contrario, en la relatividad especial *hay* una noción de giro, incluso en un universo vacío, de modo que la superficie del agua puede ser cóncava (y la tensión en la cuerda atada entre las rocas puede ser tensa). En este sentido, la relatividad restringida viola las ideas de Mach.

8. Albrecht Fölsing, *Albert Einstein* (Nueva York: Viking Press, 1997), págs. 208 a 10.

9. El lector matemáticamente inclinado observará que si elegimos las unidades de manera que la velocidad de la luz tome la forma de una unidad espacial por una unidad de tiempo (como un año luz por año o un segundo luz por segundo, donde un año luz es alrededor de 6 billones de millas y un segundo luz es alrededor de 186.000 millas), entonces la luz se mueve a través del espacio tiempo en rayos de 45 grados (porque tales líneas diagonales son las que cubren una unidad espacial en una unidad de tiempo, dos unidades espaciales en dos unidades de tiempo, etc.). Puesto que nada puede exceder la velocidad de la luz, cualquier objeto material debe cubrir menos distancia en el espacio en un intervalo de tiempo dado que la que cubriría un rayo de luz, y por lo tanto el camino que sigue a través del espaciotiempo debe formar un ángulo con la línea central del diagrama (la línea que atraviesa el centro del pan de corteza a corteza) que sea menor de 45 grados. Además, Einstein demostró que los cortes de tiempo para un observador que se mueve con una velocidad *v* -todo el espacio en un momento del tiempo de dicho observador- tienen una ecuación (suponiendo una dimensión espacial para simplificar) dada por t en $_{movimiento}$ = ($t_{estacionario}$ - (v/c^2) $x_{estacionario}$), donde = $(1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, y c es la velocidad de la luz. En unidades donde c = 1, observamos que < 1 y por lo tanto una fracción de tiempo para el observador en movimiento -el lugar donde t en movimiento toma un valor fijo- es de la forma (t estacionario- vx estacionario) = constante. Tales rodajas de tiempo están anguladas con respecto a las rodajas de tiempo estacionarias (los loci de la forma $t_{estacionaria}$ = constante), y debido a que v < 1, el ángulo entre ellas es inferior a 45 grados.

10. Para el lector con inclinación matemática, la afirmación que se hace es que la geodésica del espacio tiempo de Minkowski -las trayectorias de la longitud del espacio tiempo extremo entre dos puntos dados- son entidades geométricas que no dependen de ninguna elección particular de coordenadas o marco de referencia. Son características geométricas intrínsecas y absolutas del espacio tiempo. Explícitamente, utilizando la métrica estándar de Minkowski, las geodésicas (parecidas al tiempo) son líneas rectas (cuyo ángulo con respecto al eje del tiempo es inferior a 45 grados, ya que la velocidad implicada es menor que la de la luz).

11. Hay otra cosa importante en la que todos los observadores, independientemente de su movimiento, también están de acuerdo. Está implícito

en lo que hemos descrito, pero vale la pena decirlo directamente. Si un acontecimiento es la causa de otro (disparo una piedrita, causando la ruptura de una ventana), todos los observadores están de acuerdo en que la causa ocurrió *antes que el* efecto (todos los observadores están de acuerdo en que disparé la piedrita *antes de que se rompiera la* ventana). Para el lector con inclinación matemática, en realidad no es difícil ver esto utilizando nuestra representación esquemática del espacio tiempo. Si el evento A es la causa del evento B, entonces una línea trazada de A a B intersecta cada uno de los cortes de tiempo (cortes de tiempo de un observador en reposo con respecto a A) en un ángulo *mayor* de 45 grados (el ángulo entre los ejes espaciales -ejes que se encuentran en cualquier corte de tiempo dado- y la línea entre A y B es mayor de 45 grados). Por ejemplo, si A y B tienen lugar en el mismo lugar del espacio (la goma elástica que envuelve mi dedo [A] hace que mi dedo se vuelva blanco [B]), entonces la línea que conecta A y B forma un ángulo de 90 grados con respecto a los cortes de tiempo. Si A y B tienen lugar en diferentes lugares del espacio, lo que sea que haya viajado de A a B para ejercer la influencia (mi guijarro viajando de la honda a la ventana) lo hizo a menos de la velocidad de la luz, lo que significa que el ángulo difiere de 90 grados (el ángulo cuando no hay velocidad) en menos de 45 grados, es decir, el ángulo con respecto a las rebanadas de tiempo (los ejes del espacio) es mayor de 45 grados. (Recuerda de la nota 9 de este capítulo que la velocidad de la luz establece el límite y tal movimiento traza líneas de 45 grados). Ahora bien, como en la nota 9, los diferentes cortes de tiempo asociados a un observador en movimiento están en ángulo con respecto a los de un observador en reposo, pero el ángulo es siempre *inferior* a 45 grados (ya que el movimiento relativo entre dos observadores materiales es siempre inferior a la velocidad de la luz). Y como el ángulo asociado a los acontecimientos relacionados con la causa es siempre *mayor* de 45 grados, los cortes de tiempo de un observador, que necesariamente viaja a menos de la velocidad de la luz, no puede encontrar primero el efecto y luego la causa. Para todos los observadores, la causa precederá al efecto.

12. La noción de que las causas preceden a sus efectos (véase la nota precedente) se pondría en tela de juicio, entre otras cosas, si las influencias pudieran viajar más rápido que la velocidad de la luz.

13. Isaac Newton, *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World,* trans. A. Motte y Florian Cajori (Berkeley: University of California Press, 1962), vol. 1, pág. 634.

14. Debido a que la atracción gravitatoria de la Tierra difiere de un lugar a otro, un observador espacialmente extendido y en caída libre puede todavía detectar una influencia gravitatoria residual. Es decir, si el observador, mientras cae, suelta dos pelotas de béisbol, una de su brazo derecho extendido y la otra de su brazo izquierdo, cada una caerá por un camino hacia el centro de la Tierra. Así, desde la perspectiva del observador, caerá directamente hacia el centro de la Tierra, mientras que la pelota liberada de su mano derecha viajará hacia abajo y

ligeramente hacia la izquierda, mientras que la pelota liberada de su mano izquierda viajará hacia abajo y ligeramente hacia la derecha. A través de una cuidadosa medición, el observador verá por lo tanto que la distancia entre las dos pelotas de béisbol disminuye lentamente; se mueven una hacia la otra. Para este efecto, sin embargo, es crucial que las pelotas de béisbol fueron liberadas en lugares ligeramente diferentes en el espacio, de modo que sus trayectorias de caída libre hacia el centro de la Tierra también fueron ligeramente diferentes. Así, una afirmación más precisa de la comprensión de Einstein es que cuanto más pequeña es la extensión espacial de un objeto, más completamente puede eliminar la gravedad yendo en caída libre. Aunque es un importante punto de principio, esta complicación puede ser ignorada con seguridad a lo largo de la discusión.

15. Para una explicación más detallada, aunque a nivel general, de la deformación del espacio y el tiempo según la relatividad general, véase, por ejemplo, el capítulo 3 de *El Universo Elegante.*

16. Para el lector con formación matemática, las ecuaciones de Einstein son $G = (8 G/c^{4}) T$, donde el lado izquierdo describe la curvatura del espacio tiempo utilizando el tensor de Einstein y el lado derecho describe la distribución de la materia y la energía en el universo utilizando el tensor de energía-momento.

17. Charles Misner, Kip Thorne, y John Archibald Wheeler, *Gravitación* (San Francisco: W. H. Freeman and Co., 1973), pp. 544-45.

18. En 1954, Einstein escribió a un colega: "De hecho, ya no se debe hablar del principio de Mach en absoluto" (como se cita en Abraham Pais, *Sutil es el Señor,* p. 288).

19. Como se mencionó anteriormente, las generaciones sucesivas han atribuido las siguientes ideas a Mach aunque sus propios escritos no expresan las cosas explícitamente de esta manera.

20. Una calificación aquí es que los objetos que están tan distantes que no ha habido suficiente tiempo desde el comienzo del universo para que su luz - o la influencia gravitacional - todavía nos alcance no tienen ningún impacto en la gravedad que sentimos.

21. El lector experto reconocerá que esta afirmación es, técnicamente hablando, demasiado fuerte, ya que existen soluciones no triviales (es decir, de espacio no Minkowski) de espacio vacío para la relatividad general. Aquí estoy simplemente utilizando el hecho de que la relatividad especial puede ser pensada como un caso especial de la relatividad general en el que la gravedad es ignorada.

22. Para equilibrar, permítanme señalar que hay físicos y filósofos que no están de acuerdo con esta conclusión. Aunque Einstein se rindió al principio de Mach,

durante los últimos treinta años ha tomado vida propia. Se han presentado varias versiones e interpretaciones de la idea de Mach y, por ejemplo, algunos físicos han sugerido que la relatividad general abarca fundamentalmente las ideas de Mach; sólo que algunas formas particulares que el espacio tiempo puede tener -como el infinito espacio plano de un universo vacío- no lo hacen. Tal vez, sugieren, cualquier espaciotiempo que sea remotamente realista -poblado por estrellas y galaxias, etc.- satisface el principio de Mach. Otros han ofrecido reformulaciones del principio de Mach en las que la cuestión ya no es cómo se comportan los objetos, como las rocas atadas por una cuerda o los cubos llenos de agua, en un universo por lo demás vacío, sino más bien cómo se relacionan entre sí los diversos cortes temporales -las diversas geometrías espaciales tridimensionales- a través del tiempo. Una referencia esclarecedora del pensamiento moderno sobre estas ideas es *el Principio de Mach: From Newton's Bucket to Quantum Gravity,* Julian Barbour and Herbert Pfister, eds. (Berlín: Birkhäuser, 1995), que es una colección de ensayos sobre el tema. Como un interesante aparte, esta referencia contiene una encuesta a unos cuarenta físicos y filósofos sobre su punto de vista sobre el principio de Mach. La mayoría (más del 90 por ciento) estuvieron de acuerdo en que la relatividad general no se ajusta totalmente a las ideas de Mach. Otra excelente y extremadamente interesante discusión de estas ideas, desde una perspectiva claramente pro-Maquiano y a un nivel adecuado para los lectores en general, es el libro de Julian Barbour *The End of Time: The Next Revolution in Physics* (Oxford: Oxford University Press, 1999).

23. El lector con inclinación matemática podría encontrar esclarecedor aprender que Einstein creía que el espacio tiempo no tenía existencia independiente de su métrica (el dispositivo matemático que da las relaciones de distancia en el espacio tiempo), de modo que si se eliminara todo -incluida la métrica- el espacio tiempo *no* sería un algo. Por "espaciotiempo" siempre me refiero a un múltiplo junto con una métrica que resuelve las ecuaciones de Einstein, por lo que la conclusión a la que hemos llegado, en lenguaje matemático, es que el espaciotiempo métrico es un algo.

24. Max Jammer, *Conceptos del Espacio,* p. xvii.

Capítulo 4

1. Más exactamente, esto parece ser una concepción medieval con raíces históricas que se remontan a Aristóteles.

2. Como veremos más adelante en el libro, hay reinos (como el big bang y los agujeros negros) que todavía presentan muchos misterios, al menos en parte debido a los extremos de pequeño tamaño y enormes densidades que hacen que incluso la teoría más refinada de Einstein se derrumbe. Por lo tanto, la afirmación aquí se aplica a todos los contextos menos a los extremos en los que las leyes conocidas se vuelven sospechosas.

3. Un antiguo lector de este texto, y uno que, sorprendentemente, tiene una experiencia particular en el vudú, me ha informado de que se imagina algo que *va* de un lugar a otro para llevar a cabo las intenciones del practicante de vudú, es decir, un espíritu. Así que mi ejemplo de un proceso extravagante no local puede, dependiendo de tu opinión sobre el vudú, ser defectuoso. Sin embargo, la idea es clara.

4. Para evitar cualquier confusión, permítanme volver a recalcar desde el principio que cuando digo "El universo no es local" o "Algo que hacemos aquí puede estar entrelazado con algo de allá", no me refiero a la capacidad de ejercer un control intencionado instantáneo sobre algo lejano. En su lugar, como quedará claro, el efecto al que me refiero se manifiesta como *correlaciones* entre eventos que tienen lugar -generalmente, en forma de correlaciones entre los resultados de las mediciones- en lugares distantes (lugares para los que no habría tiempo suficiente para que incluso la luz viajara de uno a otro). Por lo tanto, me refiero a lo que los físicos llaman correlaciones *no locales.* A primera vista, tales correlaciones pueden no parecer particularmente sorprendentes. Si alguien le envía una caja que contiene un miembro de un par de guantes, y envía el otro miembro del par a su amigo a miles de kilómetros de distancia, habrá una correlación entre la entrega del guante que cada uno de ustedes ve al abrir su respectiva caja: si ve la izquierda, su amigo verá la derecha; si ve la derecha, su amigo verá la izquierda. Y, claramente, nada en estas correlaciones es en absoluto misterioso. Pero, como describiremos gradualmente, las correlaciones aparentes en el mundo cuántico parecen ser de un carácter muy diferente. Es como si tuvieras un par de "guantes cuánticos" en los que cada miembro puede ser zurdo o diestro, y se compromete a ser definitivamente diestro sólo cuando se le observa o interactúa apropiadamente. La rareza surge porque, aunque cada guante parece elegir su destreza manual de forma aleatoria cuando se observa, los guantes funcionan en tándem, aunque estén muy separados: si uno elige la izquierda, el otro elige la derecha, y viceversa.

5. La mecánica cuántica hace predicciones sobre el micromundo que coinciden fantásticamente con las observaciones experimentales. En esto, hay un acuerdo universal. No obstante, como las características detalladas de la mecánica cuántica, tal como se examinan en este capítulo, difieren significativamente de las de la experiencia común y, en relación con ello, como hay diferentes formulaciones matemáticas de la teoría (y diferentes formulaciones de cómo la teoría abarca la brecha entre el micromundo de los fenómenos y el macromundo de los resultados medidos), no hay consenso sobre cómo *interpretar* diversas características de la teoría (y diversos datos desconcertantes que la teoría, sin embargo, es capaz de explicar matemáticamente), incluidas las cuestiones de la no localidad. En este capítulo, he adoptado un punto de vista particular, el que encuentro más convincente basado en la comprensión teórica actual y los resultados experimentales. Pero, subrayo aquí que no todo el mundo está de acuerdo con este punto de vista, y en una nota final posterior, después de explicar

esta perspectiva con más detalle, señalaré brevemente algunas de las otras perspectivas e indicaré dónde se puede leer más sobre ellas. Permítanme también subrayar, como veremos más adelante, que los experimentos contradicen la creencia de Einstein de que los datos podrían explicarse únicamente sobre la base de partículas que siempre poseen propiedades definidas, aunque ocultas, *sin ningún uso o mención de enredo no local.* Sin embargo, el fracaso de esta perspectiva sólo descarta un universo local. No descarta la posibilidad de que las partículas tengan esas características ocultas definidas.

6. Para el lector con inclinación matemática, permítanme señalar un aspecto potencialmente engañoso de esta descripción. Para los sistemas multipartículas, la onda de probabilidad (la función de onda, en terminología estándar) tiene esencialmente la misma interpretación que la que se acaba de describir, pero se define como una función en el *espacio de configuración de* las partículas (para una sola partícula, el espacio de configuración es isomórfico al espacio real, pero para un sistema de partículas N tiene 3N dimensiones). Es importante tener esto en cuenta cuando se piensa en la cuestión de si la función de onda es una entidad física real o un mero dispositivo matemático, ya que si se adopta la primera posición, habría que adoptar también la realidad del espacio de configuración, una variación interesante sobre los temas de los capítulos 2 y 3. En la teoría cuántica relativista de campos, los campos pueden definirse en las cuatro dimensiones espacio-temporales habituales de la experiencia común, pero también hay formulaciones algo menos utilizadas que invocan funciones de onda generalizadas, las llamadas funciones *de onda* definidas en un espacio aún más abstracto, el *espacio de campo.*

7. Los experimentos a los que me refiero son los del *efecto fotoeléctrico,* en los que la luz que brilla sobre varios metales hace que los electrones sean expulsados de la superficie del metal. Los experimentadores descubrieron que cuanto mayor es la intensidad de la luz, mayor es el número de electrones emitidos. Además, los experimentos revelaron que la energía de cada electrón eyectado estaba determinada por el color - la frecuencia - de la luz. Esto, como argumentó Einstein, es fácil de entender si el haz de luz está compuesto de partículas, ya que una mayor intensidad de la luz se traduce en más partículas de luz (más fotones) en el haz, y cuantos más fotones haya, más electrones golpearán y, por lo tanto, se expulsarán de la superficie metálica. Además, la frecuencia de la luz determinaría la energía de cada fotón, y por lo tanto la energía de cada electrón eyectado, precisamente de acuerdo con los datos. Las propiedades particulares de los fotones fueron finalmente confirmadas por Arthur Compton en 1923 a través de experimentos que involucraban la dispersión elástica de electrones y fotones.

8. Instituto Internacional de Física Solvay, *Informe y debates del 5º Consejo* (París, 1928), págs. 253 y ss.

9. Irene Born, trans., *The Born-Einstein Letters* (Nueva York: Walker, 1971), pág. 223.

10. Henry Stapp, *Nuovo Cimento* 40B (1977), 191-204.

11. David Bohm está entre las mentes creativas que trabajaron en la mecánica cuántica durante el siglo XX. Nació en Pensilvania en 1917 y fue estudiante de Robert Oppenheimer en Berkeley. Mientras enseñaba en la Universidad de Princeton, fue llamado a comparecer ante el Comité de Actividades Anti-Americanas de la Cámara de Representantes, pero se negó a testificar en las audiencias. En su lugar, abandonó los Estados Unidos, convirtiéndose en profesor de la Universidad de São Paulo en Brasil, luego en el Technion en Israel y finalmente en el Birkbeck College de la Universidad de Londres. Vivió en Londres hasta su muerte en 1992.

12. Ciertamente, si se espera lo suficiente, lo que se hace a una partícula puede, en principio, afectar a la otra: una partícula podría enviar una señal que alertara a la otra de que había sido sometida a una medición, y esta señal podría afectar a la partícula receptora. Sin embargo, como ninguna señal puede viajar más rápido que la velocidad de la luz, este tipo de influencia no es instantánea. El punto clave de la presente discusión es que en el mismo momento en que medimos el spin de una partícula sobre un eje elegido aprendemos el spin de la otra partícula sobre ese eje. Por lo tanto, cualquier tipo de comunicación "estándar" entre las partículas -comunicación lumínica o sublumínica- no es relevante.

13. En esta y la siguiente sección, la destilación del descubrimiento de Bell que estoy usando es una "dramatización" inspirada en los maravillosos papeles de David Mermin: "Misterios cuánticos para cualquiera", *Journal of Philosophy* 78, (1981), pp. 397-408; "¿Puede ayudar a su equipo esta noche viendo la televisión?", en Consecuencias filosóficas *de la teoría cuántica: Reflectionson Bell's Theorem,* James T. Cushing y Ernan McMullin, eds. (University of Notre Dame Press, 1989); "Spooky Action at a Distance: Mysteries of the Quantum Theory", en *The Great Ideas Today* (Encyclopaedia Britannica, Inc., 1988), que se recogen en N. David Mermin, *Boojums All the Way Through* (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1990). Para cualquiera que esté interesado en seguir estas ideas de una manera más técnica, no hay mejor lugar para empezar que con los propios documentos de Bell, muchos de los cuales están recogidos en J. S. Bell, Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1997).

14. Si bien la suposición de localidad es fundamental para el argumento de Einstein, Podolsky y Rosen, los investigadores han tratado de encontrar fallas en otros elementos de su razonamiento en un intento de evitar la conclusión de que el universo admite características no locales. Por ejemplo, a veces se afirma que todo lo que se necesita es renunciar al llamado realismo, es decir, a la idea de que

los objetos poseen las propiedades que se miden para que sean independientes del proceso de medición. En este contexto, sin embargo, tal afirmación no tiene sentido. Si el razonamiento EPR hubiera sido confirmado por el experimento, no habría nada misterioso en las correlaciones de largo alcance de la mecánica cuántica; no serían más sorprendentes que las correlaciones clásicas de largo alcance, como la forma en que encontrar su guante izquierdo por aquí asegura que su compañero por allá es un guante derecho. Pero tal razonamiento es refutado por los resultados de Bell/Aspect. Ahora bien, si en respuesta a esta refutación de EPR renunciamos al realismo - como lo hacemos en la mecánica cuántica estándar - eso no hace nada para disminuir la asombrosa rareza de las correlaciones de largo alcance entre procesos *aleatorios* ampliamente separados; cuando renunciamos al realismo, los guantes, como en la nota final 4, se convierten en "guantes cuánticos". Renunciar al realismo no hace, de ninguna manera, que las correlaciones no locales observadas sean menos extrañas. Es cierto que si, a la luz de los resultados de EPR, Bell y Aspect, tratamos de mantener el realismo -por ejemplo, como en la teoría de Bohm discutida más adelante en el capítulo- el tipo de no-localidad que requerimos para ser consistentes con los datos parece ser más severo, involucrando interacciones no-locales, no sólo correlaciones no-locales. Muchos físicos se han resistido a esta opción y han renunciado así al realismo.

15. Véase, por ejemplo, Murray Gell-Mann, *The Quark and the Jaguar* (Nueva York: Freeman, 1994), y Huw Price, *Time's Arrow and Archimedes' Point* (Oxford: Oxford University Press, 1996).

16. La relatividad especial prohíbe que cualquier cosa que haya viajado más despacio que la velocidad de la luz cruce la barrera de la velocidad de la luz. Pero si algo *siempre* ha viajado más rápido que la velocidad de la luz, no está estrictamente descartado por la relatividad especial. Las partículas hipotéticas de este tipo se llaman taquiones. La mayoría de los físicos creen que los taquiones no existen, pero otros disfrutan manipulando la posibilidad de que sí existan. Hasta ahora, sin embargo, debido en gran parte a las extrañas características que una partícula tan rápida como la luz tendría según las ecuaciones de la relatividad restringida, nadie ha encontrado ningún uso particular para ellos, ni siquiera hipotéticamente hablando. En los estudios modernos, una teoría que da lugar a los taquiones es generalmente vista como sufriendo una inestabilidad.

17. El lector con inclinación matemática debería observar que, en su núcleo, la relatividad especial afirma que las leyes de la física deben ser invariantes de Lorentz, es decir, invariantes bajo transformaciones de coordenadas SO(3,1) en el espacio tiempo de Minkowski. La conclusión, por lo tanto, es que la mecánica cuántica se cuadraría con la relatividad restringida si se pudiera formular de una manera totalmente invariante de Lorentz. Ahora bien, la mecánica cuántica relativista y la teoría de campo cuántico relativista han avanzado mucho hacia este objetivo, pero hasta ahora no hay un acuerdo total en cuanto a si han abordado el

problema de la medición cuántica en un marco de trabajo con la variante de Lorentz. En la teoría de campos cuánticos relativista, por ejemplo, es sencillo calcular, de una manera completamente invariable por Lorentz, las amplitudes y probabilidades de probabilidad para los resultados de varios experimentos. Pero los tratamientos estándar se quedan cortos al no describir también la forma en que uno u otro resultado particular emerge de la gama de posibilidades cuánticas, es decir, lo que ocurre en el proceso de medición. Esta es una cuestión particularmente importante para el enredo, ya que el fenómeno depende del efecto de lo que hace un experimentador: el acto de medir una de las propiedades de la partícula enredada. Para un análisis más detallado, véase Tim Maudlin, *Quantum Non-locality and Relativity* (Oxford: Blackwell, 2002).

18. Para el lector con inclinación matemática, aquí está el cálculo de la mecánica cuántica que hace predicciones de acuerdo con estos experimentos. Supongamos que los ejes a lo largo de los cuales los detectores miden el espín son verticales y 120 grados en el sentido de las agujas del reloj y en sentido contrario a las agujas del reloj desde la vertical (como el mediodía, las cuatro y las ocho en dos relojes, uno para cada detector, que están enfrentados) y consideremos, por el bien del argumento, dos electrones que emergen espalda con espalda y se dirigen hacia estos detectores en el llamado estado singlete. Este es el estado cuyo espín total es cero, asegurando que si se encuentra un electrón en el estado de espín, el otro estará en el estado de espín, alrededor de un eje dado, y viceversa. (Recordemos que para facilitar el texto, he descrito la correlación entre los electrones como la que asegura que si uno está en estado de spin-up, también lo está el otro, y si uno está en estado de spin-down, también lo está el otro; de hecho, la correlación es aquella en la que los giros apuntan en direcciones opuestas. Para hacer contacto con el texto principal, siempre se puede imaginar que los dos detectores están calibrados de forma opuesta, de modo que lo que uno llama spin-up el otro llama spin-down). Un resultado estándar de la mecánica cuántica elemental muestra que si el ángulo entre los ejes a lo largo del cual nuestros dos detectores miden los espines del electrón es, entonces la probabilidad de que midan valores de espín opuestos es de cos ^{2} (/2). Así pues, si los ejes de los detectores están alineados (= 0), definitivamente miden valores de espín opuestos (el análogo de los detectores en el texto principal siempre mide el mismo valor cuando se fijan en la misma dirección), y si se fijan en +120° o -120°, la probabilidad de que midan espines opuestos es cos ^{2} (+120° o - 120°) = ^{1}/4. Ahora bien, si los ejes del detector se fijan al azar, ^{1}/3 del tiempo apuntarán en la misma dirección, y ^{2}/3 del tiempo no lo harán. Por lo tanto, en todas las carreras, esperamos encontrar giros opuestos ($^{1/3)}$(1) + ($^{2/3)}$(^{1}/4) = ^{1}/2 del tiempo, según lo encontrado por los datos.

Puede resultar extraño que el supuesto de localidad produzca una correlación de espín más alta (más del 50 por ciento) que la que encontramos con la mecánica cuántica estándar (exactamente el 50 por ciento); el entrelazamiento de largo alcance de la mecánica cuántica, se podría pensar, debería producir una mayor correlación. De hecho, así es. Una forma de pensar al respecto es esta: Con sólo

un 50 por ciento de correlación en todas las mediciones, la mecánica cuántica produce una correlación del 100 por ciento para las mediciones en las que los ejes detectores izquierdo y derecho se eligen para apuntar en la misma dirección. En el universo local de Einstein, Podolsky y Rosen, se requiere una correlación superior al 55 por ciento en todas las mediciones para asegurar una concordancia del 100 por ciento cuando se eligen los mismos ejes. Aproximadamente, entonces, en un universo local, una correlación del 50 por ciento sobre todas las mediciones implicaría *menos* de un 100 por ciento de correlación cuando se eligen los mismos ejes, es decir, menos de una correlación que la que encontramos en nuestro universo cuántico no local.

19. Se podría pensar que un colapso instantáneo, desde el principio, caería en el límite de velocidad establecido por la luz y por lo tanto aseguraría un conflicto con la relatividad especial. Y si las ondas de probabilidad fueran de hecho como las ondas de agua, tendrías un punto irrefutable. Que el valor de una onda de probabilidad cayera repentinamente a cero en una enorme extensión sería mucho más impactante que toda el agua en el Océano Pacífico que instantáneamente se vuelve perfectamente plana y deja de moverse. Pero, los practicantes de la mecánica cuántica argumentan que las ondas de probabilidad *no* son como las ondas de agua. Una onda de probabilidad, aunque describe la materia, no es una cosa material en sí misma. Y, según estos practicantes, la barrera de la velocidad de la luz se aplica sólo a los objetos materiales, cosas cuyo movimiento puede ser visto, sentido y detectado directamente. Si la onda de probabilidad de un electrón ha caído a cero en la galaxia de Andrómeda, un físico de Andrómeda simplemente fallará, con un 100% de certeza, en la detección del electrón. Nada en las observaciones de Andrómeda revela el repentino cambio en la onda de probabilidad asociada con la detección exitosa, digamos, del electrón en la ciudad de Nueva York. Mientras el electrón en sí no viaje de un lugar a otro a una velocidad superior a la de la luz, no hay conflicto con la relatividad especial. Y, como puedes ver, todo lo que ha pasado es que el electrón se encontró en la ciudad de Nueva York y no en ningún otro lugar. Su velocidad nunca entró en la discusión. Por lo tanto, aunque el colapso instantáneo de la probabilidad es un marco que viene con rompecabezas y problemas (discutido más ampliamente en el capítulo 7), no necesariamente implica un conflicto con la relatividad restringida.

20. Para una discusión de algunas de estas propuestas, ver Tim Maudlin, *Quantum Nonlocalityand Relativity.*

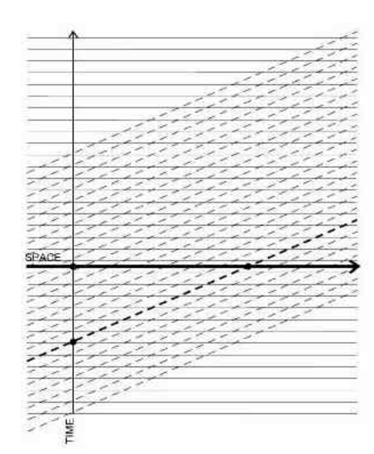
Capítulo 5

1. Para el lector matemáticamente inclinado, de la ecuación $t_{\text{en movimiento}} = (t_{\text{estacionario}} - (v/c^2)\, x_{\text{estacionario}})$ (discutido en la nota 9 del capítulo 3) encontramos que la lista de ahora de Chewie en un momento dado contendrá eventos que los observadores en la tierra afirmarán que ocurrieron $(v/c^2)\, x_{\text{tierra}}$ antes, donde x_{tierra} es la distancia de Chewie a la tierra. Esto supone que Chewie se está alejando de la Tierra. Para

el movimiento hacia la tierra, *v* tiene el signo opuesto, por lo que los observadores en la tierra afirmarán que tales eventos ocurrieron $(v/c^2)x_{tierra}$ más tarde. Fijando v = 10 millas por hora y $x_{tierra} = 10^{10}$ años-luz, encontramos $(v/c^2)\,x_{tierra}$ es alrededor de 150 años.

2. Este número -y un número similar dado en unos pocos párrafos más adelante al describir el movimiento de Chewie hacia la tierra- era válido al momento de la publicación del libro. Pero a medida que pase el tiempo aquí en la tierra, se volverán ligeramente inexactos.

3. El lector con inclinación matemática debería observar que la metáfora de cortar el pan del espacio-tiempo en diferentes ángulos es el concepto habitual de los *diagramas del espacio-tiempo* que se enseña en los cursos sobre relatividad especial. En los diagramas de espacio tiempo, todo el espacio tridimensional en un momento dado del tiempo, según un observador que se considere estacionario, se denota por una línea horizontal (o, en diagramas más elaborados, por un plano horizontal), mientras que el tiempo se denota por el eje vertical. (En nuestra representación, cada "rebanada de pan" - un plano - representa todo el espacio en un momento del tiempo, mientras que el eje que atraviesa el centro del pan, de corteza a corteza, es el eje del tiempo). Los diagramas espacio-temporales proporcionan una forma perspicaz de ilustrar el punto que se está haciendo sobre las rebanadas de ahora de ti y Chewie.



Las líneas sólidas de luz son cortes de tiempo iguales (ahora cortes) para los observadores en reposo con respecto a la Tierra (por simplicidad, imaginamos que la Tierra no está rotando ni experimentando ninguna aceleración, ya que éstas son complicaciones irrelevantes para el punto que se está haciendo), y las líneas punteadas de luz son cortes de tiempo iguales para los observadores que se alejan de la Tierra a, digamos, 9,3 millas por hora. Cuando Chewie está en reposo con respecto a la Tierra, las primeras representan sus cortes de ahora (y como usted está en reposo en la Tierra a lo largo de la historia, estas líneas sólidas claras siempre representan sus cortes de ahora), y la línea sólida más oscura

muestra el corte de ahora que le contiene (el punto oscuro de la izquierda), en el siglo XXI de la Tierra, y él (el punto oscuro de la derecha), ambos sentados y leyendo. Cuando Chewie se aleja de la Tierra, las líneas punteadas representan sus cortes de ahora, y la línea punteada más oscura muestra el corte de ahora que contiene a Chewie (que se acaba de levantar y ha empezado a caminar) y a John Wilkes Booth (el punto oscuro inferior izquierdo). Nótese, también, que uno de los siguientes cortes de tiempo punteados contendrá a Chewie caminando (¡si es que todavía está por aquí!) y a ti, en el siglo XXI, sentado leyendo. Por lo tanto, un solo momento para ti aparecerá en dos de las listas de Chewie, una de relevancia antes y otra de relevancia después de que empezara a caminar. Esto muestra otra forma en la que la simple noción intuitiva de *ahora* -cuando se prevé que se aplique en todo el espacio- se transforma por la relatividad especial en un concepto con características muy inusuales. Además, estas listas de ahora *no codifican* la causalidad: la causalidad estándar (nota 11, capítulo 3) sigue estando plenamente vigente. La lista de "ahora" de Chewie salta porque salta de un marco de referencia a otro. Pero todos los observadores -utilizando una única y bien definida elección de coordinación espacio-temporal- estarán de acuerdo con todos los demás en cuanto a qué eventos pueden afectar a cada uno.

4. El lector experto reconocerá que asumo que el espacio tiempo es minkowskiano. Un argumento similar en otras geometrías no necesariamente dará lugar a todo el espacio tiempo.

5. Albert Einstein y Michele Besso: Correspondencia 1903-1955, P. Speziali, ed. (París: Hermann, 1972).

6. La discusión aquí tiene como objetivo dar un sentido cualitativo de cómo una experiencia en este momento, junto con los recuerdos que tienes en este momento, forma la base de tu sentido de haber experimentado una vida en la que has vivido esos recuerdos. Pero, si, por ejemplo, su cerebro y su cuerpo se pusieran de alguna manera exactamente en el mismo estado en que se encuentran ahora mismo, usted tendría la misma sensación de haber vivido la vida que sus recuerdos atestiguan (suponiendo, como yo lo hago, que la base de toda experiencia puede encontrarse en el estado físico del cerebro y del cuerpo), incluso si esas experiencias nunca ocurrieron realmente, sino que se imprimieron artificialmente en su estado cerebral. Una simplificación del debate es la suposición de que podemos sentir o experimentar cosas que suceden en un solo instante, cuando, en realidad, se requiere tiempo de procesamiento para que el cerebro reconozca e interprete cualquier estímulo que reciba. Si bien es cierto, esto no tiene especial relevancia en el punto que estoy planteando; es una complicación interesante pero en gran medida irrelevante que surge del análisis del tiempo de una manera directamente relacionada con la experiencia humana. Como hemos dicho antes, los ejemplos humanos ayudan a que nuestra discusión sea más fundamentada y visceral, pero requiere que saquemos a relucir los

aspectos de la discusión que son más interesantes desde una perspectiva biológica que desde una perspectiva física.

7. Se preguntarán cómo se relaciona la discusión de este capítulo con nuestra descripción en el capítulo 3 de los objetos que se "mueven" a través del espacio tiempo a la velocidad de la luz. Para el lector matemáticamente poco inclinado, la respuesta aproximada es que la historia de un objeto está representada por una curva en el espaciotiempo, un camino a través del pan del espaciotiempo que pone de relieve todos los lugares en los que el objeto ha estado en el momento en que estuvo allí (muy parecido a lo que vemos en la figura 5.1). La noción intuitiva de "moverse" a través del espacio tiempo, por lo tanto, puede expresarse en lenguaje "sin flujo" simplemente especificando este camino (en contraposición a imaginar el camino que se traza ante sus ojos). La "velocidad" asociada a este camino es entonces una medida de la longitud del camino (de un punto elegido a otro), dividida por la diferencia de tiempo registrada en un reloj llevado por alguien o algo entre los dos puntos elegidos del camino. Esta, de nuevo, es una concepción que no implica ningún flujo de tiempo: simplemente se mira lo que el reloj en cuestión dice en los dos puntos de interés. Resulta que la velocidad encontrada de esta manera, para *cualquier* movimiento, es igual a la velocidad de la luz. El lector matemáticamente inclinado se dará cuenta de que la razón de esto es inmediata. En el espaciotiempo de Minkowski la métrica es $ds^2 = c^2 dt^2 - dx^2$ (donde dx^2 es la longitud euclídea $dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$), mientras que el tiempo que lleva un reloj (el tiempo "propio") viene dado por $d^2 = ds^2/c^2$. Por lo tanto, claramente, la velocidad a través del espacio tiempo tal como se acaba de definir viene dada matemáticamente por ds/d, que es igual a c.

8. Rudolf Carnap, "Autobiografía", en The Philosophy of Rudolf Carnap, P. A. Schilpp, ed. (Chicago: Biblioteca de Filósofos Vivientes, 1963), p. 37.

Capítulo 6

1. Note que la asimetría a la que se refiere - la flecha del tiempo - se desprende del orden en el que los eventos tienen lugar *en el* tiempo. También podrías preguntarte sobre las asimetrías en el tiempo mismo, por ejemplo, como veremos en capítulos posteriores, según algunas teorías cosmológicas el tiempo puede haber tenido un comienzo pero puede no tener un final. Estas son nociones distintas de asimetría temporal, y nuestra discusión aquí se centra en la primera. Aún así, al final del capítulo concluiremos que la asimetría temporal de las cosas en el tiempo depende de condiciones especiales en los primeros momentos de la historia del universo, y por lo tanto vincula la flecha del tiempo con aspectos de la cosmología.

2. Para el lector con inclinación matemática, permítanme señalar con más precisión lo que se entiende por simetría de tiempo inverso y señalar una intrigante excepción cuyo significado para los temas que estamos discutiendo en

este capítulo aún no ha sido completamente resuelto. La noción más simple de la simetría de inversión del tiempo es la afirmación de que un conjunto de leyes de la física es simétrico de inversión del tiempo si se le da cualquier solución a las ecuaciones, digamos S(t), entonces S(-t) es también una solución a las ecuaciones. Por ejemplo, en la mecánica newtoniana, con fuerzas que dependen de las posiciones de las partículas, si $x(t) = (x_1(t), x_{2(t)}, . . . ,x_{3n}(t))$ son las posiciones de n partículas en tres dimensiones espaciales, entonces el hecho de que x(t) resuelva $d^2x(t)/dt^2 = F(x(t))$ implica que x(-t) es también una solución a las ecuaciones de Newton, es decir $d^2 x(-t)/dt^2 = F(x(-t))$. Obsérvese que x(-t) representa el movimiento de las partículas que pasan por las mismas posiciones que ***x*** (***t***), pero en orden inverso, con velocidades inversas.

En términos más generales, un conjunto de leyes físicas nos proporciona un algoritmo para la evolución de un estado inicial de un sistema físico en el tiempo t_0 a algún otro tiempo $t + t_0$. Concretamente, este algoritmo puede verse como un mapa U(t) que toma como entrada $S(t_0)$ y produce $S(t + t_0)$, es decir: $S(t + t_0) = U(t)S(t_0)$. Decimos que las leyes que dan lugar a U(t) son simétricas en el tiempo si hay un mapa T que satisface $U(-t) = T^{-1}U(t)T$. En inglés, esta ecuación dice que mediante una adecuada manipulación del estado del sistema físico en un momento dado (realizada por **T**), la evolución por una cantidad *t* hacia adelante en el tiempo según las leyes de la teoría (realizada por U(t)) equivale a haber evolucionado el sistema t unidades de tiempo hacia atrás en el tiempo (denotado por U(-t)). Por ejemplo, si especificamos el estado de un sistema de partículas en un momento dado por sus posiciones y velocidades, entonces **T mantendría fijas** todas las posiciones de las partículas e invertiría todas las velocidades. Evolucionar tal configuración de partículas hacia adelante en el tiempo en una cantidad *t* es equivalente a haber evolucionado la configuración original de las partículas hacia atrás en el tiempo en una cantidad t. (El factor de T^{-1} deshace la inversión de la velocidad de modo que, al final, no sólo las posiciones de las partículas son lo que habrían sido *t* unidades de tiempo anteriormente, sino que también lo son sus velocidades).

Para ciertos conjuntos de leyes, la operación **T** es más complicada que para la mecánica newtoniana. Por ejemplo, si estudiamos el movimiento de las partículas cargadas en presencia de un campo electromagnético, la inversión de las velocidades de las partículas sería inadecuada para que las ecuaciones produjeran una evolución en la que las partículas retrocedieran sobre sus pasos. En cambio, la dirección del campo magnético también debe ser invertida. (Esto es necesario para que el término ***v*** × *B* en la ecuación de la ley de fuerza de Lorentz permanezca sin cambios). Por lo tanto, en este caso, la operación **T abarca ambas** transformaciones. El hecho de que tengamos que hacer algo más que invertir todas las velocidades de las partículas no tiene ningún impacto en ninguna de las discusiones que siguen en el texto. Lo único que importa es que el movimiento de las partículas en una dirección es tan consistente con las leyes físicas como el movimiento de las partículas en la dirección inversa. Que

tengamos que invertir cualquier campo magnético que se presente para lograr esto no es de particular relevancia.

Donde las cosas se vuelven más sutiles es en las débiles interacciones nucleares. Las interacciones débiles se describen mediante una teoría de campos cuánticos particular (que se discute brevemente en el capítulo 9), y un teorema general muestra que las teorías de campos cuánticos (siempre que sean locales, unitarias e invariantes de Lorentz, que son las que interesan) son siempre simétricas bajo lasoperaciones combinadas de conjugación de carga C (que sustituye a las partículas por sus antipartículas), paridad P (que invierte las posiciones a través del origen), y una operación de inversión del tiempo de los huesos desnudos *T* (que sustituye *t* por - *t*). Así pues, podríamos definir una operación **T como** el producto *CPT,* pero si la invariancia **T** requiere absolutamente que se incluya la operación *CP*, **T ya no se interpretaría** simplemente como partículas que vuelven sobre sus pasos (ya que, por ejemplo, las identidades de las partículas se cambiarían por tales **T-** las partículas serían reemplazadas por sus antipartículas y, por lo tanto, no serían las partículas originales las que vuelvan sobre sus pasos). Resulta que hay algunas situaciones experimentales exóticas en las que nos vemos forzados a este rincón. Hay ciertas especies de partículas (K-mesones, B-mesones) cuyo repertorio de comportamientos es invariable *CPT* pero no es invariable bajo *T* solamente. Esto fue establecido indirectamente en 1964 por James Cronin, Val Fitch y sus colaboradores (por lo cual Cronin y Fitch recibieron el Premio Nobel de 1980) al demostrar que los mesones K violaban la simetría CP (asegurando que deben violar la simetría *T para no* violar la *CPT*). Más recientemente, la violación de la simetría *T* ha sido directamente establecida por el experimento CPLEAR en el CERN y el experimento KTEV en el Fermilab. En términos generales, estos experimentos muestran que si se presenta una película de los procesos registrados que involucran a estas partículas de mesón, se podría determinar si la película se proyecta en la dirección correcta hacia adelante o hacia atrás. En otras palabras, estas partículas en particular pueden distinguir entre el pasado y el futuro. Lo que sigue sin estar claro, sin embargo, es si esto tiene alguna relevancia para la flecha de tiempo que experimentamos en contextos cotidianos. Después de todo, se trata de partículas exóticas que pueden producirse para momentos fugaces en colisiones de alta energía, pero no son un componente de objetos materiales familiares. A muchos físicos, entre los que me incluyo, les parece poco probable que la invariancia no reversible del tiempo evidenciada por estas partículas juegue un papel en la respuesta al rompecabezas de la flecha del tiempo, por lo que no discutiremos más este excepcional ejemplo. Pero la verdad es que nadie lo sabe con seguridad.

3. A veces encuentro que hay reticencia a aceptar la afirmación teórica de que los trozos de cáscara de huevo realmente se fusionarían en una cáscara prístina y sin grietas. Pero la simetría temporal de las leyes de la naturaleza, elaborada con mayor precisión en la nota final anterior, asegura que esto es lo que sucedería. Microscópicamente, el agrietamiento de un huevo es un proceso físico que

involucra a las diversas moléculas que componen la cáscara. Las grietas aparecen y la cáscara se rompe porque los grupos de moléculas se ven forzados a separarse por el impacto que experimenta el huevo. Si esos movimientos moleculares tuvieran lugar al revés, las moléculas se unirían de nuevo, volviendo a fusionar la cáscara en su forma anterior.

4. Para mantener el enfoque en las formas modernas de pensar sobre estas ideas, me estoy saltando una historia muy interesante. El propio pensamiento de Boltzmann sobre el tema de la entropía pasó por importantes refinamientos durante las décadas de 1870 y 1880, durante las cuales las interacciones y comunicaciones con físicos como James Clerk Maxwell, Lord Kelvin, Josef Loschmidt, Josiah Willard Gibbs, Henri Poincaré, S. H. Burbury y Ernest Zermelo fueron decisivas. De hecho, Boltzmann pensó inicialmente que podía probar que la entropía siempre y absolutamente no disminuiría para un sistema físico aislado, y no que era simplemente muy improbable que tal reducción de la entropía tuviera lugar. Pero las objeciones planteadas por estos y otros físicos llevaron posteriormente a Boltzmann a hacer hincapié en el enfoque estadístico/probabilístico del tema, el que se sigue utilizando hoy en día.

5. Me imagino que estamos usando la edición de la Biblioteca Clásica Moderna de Guerra *y Paz, traducida* por Constance Garnett, con 1.386 páginas de texto.

6. El lector matemáticamente inclinado debe notar que debido a que los números pueden llegar a ser tan grandes, la entropía se define en realidad como el logaritmo del número de arreglos posibles, un detalle que no nos concierne aquí. Sin embargo, como punto de principio, esto es importante porque es muy conveniente que la entropía sea unacantidad llamada extensiva, lo que significa que si se unen dos sistemas, la entropía de su unión es la suma de sus entropías individuales. Esto es cierto sólo para la forma logarítmica de la entropía, porque el número de disposiciones en tal situación viene dado por el producto de las disposiciones individuales, por lo que el logaritmo del número de disposiciones es aditivo.

7. Aunque *en principio* podemos predecir dónde caerá cada página, puede preocuparle que haya un elemento adicional que determine el orden de las páginas: cómo se reúnen las páginas en una pila ordenada. Esto no es relevante para la física de la que estamos hablando, pero en caso de que le moleste, imagine que estamos de acuerdo en que recogerá las páginas, una por una, empezando por la más cercana a usted, y luego recogiendo la página más cercana a esa, y así sucesivamente. (Y, por ejemplo, podemos acordar medir las distancias desde la esquina más cercana de la página en cuestión).

8. Lograr calcular el movimiento de incluso unas pocas páginas con la precisión necesaria para predecir el orden de las mismas (después de emplear algún algoritmo para apilarlas en una pila, como en la nota anterior), es en realidad

extremadamente optimista. Dependiendo de la flexibilidad y el peso del papel, un cálculo tan comparativamente "simple" podría estar aún más allá de la potencia de cálculo actual.

9. Puede preocuparle que haya una diferencia fundamental entre definir una noción de entropía para los pedidos de páginas y definir una para un conjunto de moléculas. Después de todo, los ordenamientos de páginas son discretos, se pueden contar, uno por uno, y por lo tanto, aunque el número total de posibilidades puede ser grande, es finito. Por el contrario, el movimiento y la posición de una sola molécula son continuos, no se pueden contar una por una, por lo que hay (al menos según la física clásica) un número infinito de posibilidades. Entonces, ¿cómo se puede llevar a cabo un conteo preciso de los reordenamientos moleculares? Bueno, la respuesta corta es que esta es una buena pregunta, pero una que ha sido respondida completamente, así que si eso es suficiente para aliviar su preocupación, siéntase libre de saltar lo que sigue. La respuesta más larga requiere un poco de matemáticas, así que sin antecedentes esto puede ser difícil de seguir completamente. Los físicos describen un sistema clásico de muchas partículas, invocando el *espacio de fase*, un espacio de 6N dimensiones (donde N es el número de partículas) en el que cada punto denota todas las posiciones y velocidades de las partículas (cada una de estas posiciones requiere tres números, al igual que cada velocidad, lo que explica la dimensionalidad de 6N del espacio de fase). El punto esencial es que el espacio de fase puede tallarse en regiones de tal manera que todos los puntos de una región dada correspondan a disposiciones de las velocidades y de las velocidades de las moléculas que tienen las mismas características y apariencia, en general, groseras. Si la configuración de las moléculas se cambiara de un punto de una región determinada del espacio de fase a otro punto de la misma región, una evaluación macroscópica encontraría que las dos configuraciones son indistinguibles. Ahora bien, en lugar de contar el número de puntos de una región dada -el análogo más directo de contar el número de reordenamientos de página diferentes, pero algo que seguramente dará lugar a una respuesta infinita- los físicos definen la entropía en términos del *volumen* de cada región del espacio de fase. Un mayor volumen significa más puntos y por lo tanto mayor entropía. Y el volumen de una región, incluso una región en un espacio de dimensiones superiores, es algo a lo que se le puede dar una definición matemática rigurosa. (Matemáticamente, requiere elegir algo llamado medida, y para el lector matemáticamente inclinado, señalaré que normalmente elegimos la medida que es uniforme sobre todos los microestados compatibles con un macrostate dado, es decir, cada configuración microscópica asociada con un conjunto dado de propiedades macroscópicas se supone que es igualmente probable).

10. Específicamente, sabemos una forma en la que esto *podría* suceder: si unos días antes el CO_2 estuviera inicialmente en la botella, entonces sabemos por nuestra discusión anterior que si, ahora mismo, se invirtiera simultáneamente la velocidad de todas y cada una de las moléculas de CO_2, y la de cada molécula y

átomo que ha interactuado de alguna manera con las moléculas de CO_2, y se esperara los mismos días, las moléculas *se agruparían de nuevo* en la botella. Pero esta inversión de la velocidad no es algo que se pueda lograr en la práctica, y mucho menos algo que sea probable que ocurra por sí mismo. Sin embargo, puedo notar que se puede probar matemáticamente que si se espera lo suficiente, las moléculas de CO_2, por su propia cuenta, encontrarán *su camino de regreso a la botella.* Un resultado probado en el siglo XIX por el matemático francés Joseph Liouville puede ser usado para establecer lo que se conoce como el teorema de la recurrencia de Poincaré. Este teorema muestra que, si se espera lo suficiente, un sistema con una energía finita y confinado a un volumen espacial finito (como las moléculas de CO_2 en una habitación cerrada) volverá a un estado arbitrariamente cercano a su estado inicial (en este caso, las moléculas de CO_2 todas situadas en la botella de Coca-Cola). La trampa es cuánto tiempo hay que esperar para que esto suceda. Para los sistemas con todos los componentes, excepto un pequeño número de ellos, el teorema muestra que típicamente tendrías que esperar mucho más tiempo que la edad del universo para que los componentes se reagrupen por sí mismos en su configuración inicial. Sin embargo, como punto de partida, es provocativo observar que con una paciencia y longevidad infinitas, cada sistema físico contenido espacialmente volverá a la forma en que fue configurado inicialmente.

11. Podrían preguntarse, entonces, por qué el agua se convierte en hielo, ya que eso resulta en que las moléculas de H_2O se ordenen más, es decir, que alcancen una entropía menor, no mayor. Bueno, la respuesta aproximada es que cuando el agua líquida se convierte en hielo sólido, emite energía al medio ambiente (lo contrario de lo que sucede cuando el hielo se derrite, cuando toma energía del medio ambiente), y eso aumenta la entropía ambiental. A temperaturas ambientales suficientemente bajas, es decir, por debajo de 0 grados centígrados, el aumento de la entropía ambiental supera la disminución de la entropía del agua, por lo que la congelación se ve favorecida desde el punto de vista entrópico. Por eso se forma hielo en el frío del invierno. De manera similar, cuando se forman cubos de hielo en el congelador de su refrigerador, su entropía disminuye pero el propio refrigerador bombea calor al ambiente, y si eso se tiene en cuenta, hay un aumento neto total de la entropía. La respuesta más precisa, para el lector matemáticamente inclinado, es que los fenómenos espontáneos del tipo que estamos discutiendo están gobernados por lo que se conoce como *energía libre.* Intuitivamente, la energía libre es la parte de la energía de un sistema que puede ser aprovechada para hacer el trabajo. Matemáticamente, la energía libre, F, se define por $F = U - TS$, donde la U representa la energía total, la T la temperatura, y la S la entropía. Un sistema sufrirá un cambio espontáneo si eso resulta en una disminución de su energía libre. A bajas temperaturas, la caída de la U asociada con el agua líquida que se convierte en hielo sólido supera la disminución de la S (supera el aumento de $-TS$), y así ocurrirá. Sin embargo, a altas temperaturas (por encima de los 0 grados centígrados), el cambio de hielo a agua líquida o

vapor gaseoso se ve favorecido entropicalmente (el aumento en S supera los cambios en U) y así ocurrirá.

12. Para una discusión temprana de cómo una aplicación directa del razonamiento entrópico nos llevaría a concluir que los recuerdos y los registros históricos no son relatos fidedignos del pasado, véase C. F. von Weizsäcker en The Unity of Nature (Nueva York: Farrar, Straus, and Giroux, 1980), 138-46, (publicado originalmente en *Annalen der Physik* 36 (1939). Para una excelente discusión reciente, véase David Albert en *Time and Chance* (Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2000).

13. De hecho, dado que las leyes de la física no distinguen entre avanzar y retroceder en el tiempo, la explicación de haber formado completamente los cubos de hielo media hora antes, a las 10 p.m., sería *precisamente* tan absurda -en términos entrópicos- como predecir que media hora después, a las 11 p.m., los pequeños trozos de hielo se habrían convertido en cubos de hielo completamente formados. Por el contrario, la explicación de tener agua líquida a las 10 p.m. que lentamente forma pequeños trozos de hielo a las 10:30 p.m. es *precisamente* tan sensata como predecir que a las 11 p.m. los pequeños trozos de hielo se derretirán en agua líquida, algo que es familiar y totalmente esperado. Esta última explicación, desde la perspectiva de la observación a las 10:30 p.m., es perfectamente simétrica temporalmente y, además, concuerda con nuestras observaciones posteriores.

14. El lector particularmente cuidadoso podría pensar que he prejuzgado la discusión con la frase "al principio" ya que eso inyecta una asimetría temporal. Lo que quiero decir, en un lenguaje más preciso, es que necesitaremos condiciones especiales para prevalecer en (al menos) un extremo de la dimensión temporal. Como quedará claro, las condiciones especiales equivalen a una condición límite de baja entropía y llamaré al "pasado" una dirección en la que se satisface esta condición.

15. La idea de que la flecha del tiempo requiere un pasado de baja entropía tiene una larga historia, que se remonta a Boltzmann y otros; se examinó con cierto detalle en Hans Reichenbach, *The* Direction of Time (Mineola, N.Y.: Dover Publications, 1984), y fue defendida de manera cuantitativa particularmente interesante en Roger Penrose, *The Emperor's New Mind* (Nueva York: Oxford University Press, 1989), págs. 317 y ss.

16. Recuerde que nuestra discusión en este capítulo no tiene en cuenta la mecánica cuántica. Como mostró Stephen Hawking en los años 70, cuando se consideran los efectos cuánticos, los agujeros negros permiten que se filtre cierta cantidad de radiación, pero esto no afecta a que sean los objetos de mayor entropía del cosmos.

17. Una pregunta natural es cómo sabemos que no hay alguna limitación futura que también tenga un impacto en la entropía. La conclusión es que no lo sabemos, y algunos físicos incluso han sugerido experimentos para detectar la posible influencia que esa limitación futura podría tener en las cosas que podemos observar hoy en día. Para un artículo interesante que discute la posibilidad de limitaciones futuras y pasadas de la entropía, véase Murray Gell-Mann y James Hartle, "Time Symmetry and Asymmetry in Quantum Mechanics and Quantum Cosmology", en Physical Origins of Time Asymmetry, J. J. Halliwell, J. Pérez-Mercader, W. H. Zurek, eds. (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1996), así como otros documentos en las partes 4 y 5 de esa colección.

18. A lo largo de este capítulo hemos hablado de *la flecha* del tiempo, refiriéndonos al hecho aparente de que existe una asimetría a lo largo del eje del tiempo (el eje del tiempo de cualquier observador) del espacio-tiempo: una enorme variedad de secuencias de acontecimientos se disponen en un orden a lo largo del eje del tiempo, pero el orden inverso de tales acontecimientos rara vez, si es que ocurre, se produce. A lo largo de los años, los físicos y los filósofos han dividido estas secuencias de acontecimientos en subcategorías cuyas asimetrías temporales podrían, en principio, ser objeto de explicaciones lógicamente independientes. Por ejemplo, el calor fluye de los objetos calientes a los más fríos, pero no de los objetos fríos a los calientes; las ondas electromagnéticas emanan hacia el exterior de fuentes como las estrellas y las bombillas, pero parece que nunca convergen hacia el interior en esas fuentes; el universo parece estar en expansión uniforme, y no en contracción; y recordamos el pasado y no el futuro (estas son las llamadas flechas termodinámica, electromagnética, cosmológica y psicológica del tiempo, respectivamente). Todos estos son fenómenos asimétricos en el tiempo, pero podrían, en principio, adquirir su asimetría temporal a partir de principios físicos completamente diferentes. Mi opinión, una que muchos comparten (pero otros no), es que, excepto posiblemente por la flecha cosmológica, estos fenómenos asimétricos temporales no son fundamentalmente diferentes, y en última instancia están sujetos a la misma explicación, la que hemos descrito en este capítulo. Por ejemplo, ¿por qué la radiación electromagnética viaja en ondas que se expanden hacia afuera pero no en ondas que se contraen hacia adentro, a pesar de que ambas son soluciones perfectamente buenas para las ecuaciones de Maxwell sobre el electromagnetismo? Bueno, porque nuestro universo tiene fuentes de baja entropía, coherentes y ordenadas para tales ondas externas - estrellas y bombillas, por nombrar dos - y la existencia de estas fuentes ordenadas se deriva del entorno aún más ordenado en el inicio del universo, como se discute en el texto principal. La flecha psicológica del tiempo es más difícil de abordar ya que hay tanto sobre la base microfísica del pensamiento humano que aún no hemos entendido. Pero se ha avanzado mucho en la comprensión de la flecha del tiempo en lo que respecta a las computadoras: tomar, completar y luego producir un registro de un cómputo es una secuencia computacional básica cuyas propiedades entrópicas son bien comprendidas (como las desarrolladas por

Charles Bennett, Rolf Landauer y otros) y encajan perfectamente en la segunda ley de la termodinámica. Así pues, si el pensamiento humano puede compararse con los procesos computacionales, puede aplicarse una explicación termodinámica similar. Obsérvese también que la asimetría asociada al hecho de que el universo se expande y no se contrae está relacionada con, pero es lógicamente distinta de la flecha del tiempo que hemos estado explorando. Si la expansión del universo se ralentizara, se detuviera y luego se convirtiera en una contracción, la flecha del tiempo seguiría apuntando en la misma dirección. Los procesos físicos (rotura de huevos, envejecimiento de la gente, etc.) seguirían ocurriendo en la dirección habitual, aunque la expansión del universo se hubiera invertido.

19. Para el lector con inclinación matemática, observe que cuando hacemos este tipo de afirmación probabilística estamos asumiendo una medida de probabilidad particular: la que es uniforme en todos los microestados compatibles con lo que vemos en este momento. Hay, por supuesto, otras medidas que podríamos invocar. Por ejemplo, David Albert en *Time and Chance* ha defendido el uso de una medida de probabilidad que es uniforme en todas las microfases compatibles con lo que vemos *ahora* y lo que él llama *la hipótesis del pasado:* el hecho aparente de que el universo comenzó en un estado de baja entropía. Usando esta medida, eliminamos la consideración de todas las historias, excepto las que son compatibles con el pasado de baja entropía atestiguado por nuestros recuerdos, registros y teorías cosmológicas. En esta forma de pensar, no hay ningún rompecabezas probabilístico sobre un universo con baja entropía; comenzó así, por suposición, con probabilidad 1. Sigue existiendo el mismo gran rompecabezas de *por qué comenzó de* esa manera, incluso si no está formulado en un contexto probabilístico.

20. Podría estar tentado a argumentar que el universo conocido tuvo baja entropía desde el principio simplemente porque era mucho más pequeño en tamaño de lo que es hoy en día, y por lo tanto -como un libro con menos páginas- permitía muchos menos reordenamientos de sus componentes. Pero, por sí mismo, esto no funciona. Incluso un universo pequeño puede tener una enorme entropía. Por ejemplo, un posible (aunque improbable) destino para nuestro universo es que la actual expansión se detenga, se invierta y el universo implosione algún día, terminando en la llamada gran crisis. Los cálculos muestran que aunque el tamaño del universo disminuiría durante la fase de implosión, la entropía seguiría aumentando, lo que demuestra que un tamaño pequeño no asegura una baja entropía. En el capítulo 11, sin embargo, veremos que el pequeño tamaño inicial del universo juega un papel en nuestra mejor explicación actual del comienzo de la baja entropía.

Capítulo 7

1. Es bien sabido que las ecuaciones de la física clásica no pueden ser resueltas exactamente si se estudia el movimiento de tres o más cuerpos que interactúan mutuamente. Así que, incluso en la física clásica, cualquier predicción real sobre el movimiento de un gran conjunto de partículas será necesariamente aproximada. El punto, sin embargo, es que no hay un límite fundamental para lo buena que puede ser esta aproximación. Si el mundo estuviera gobernado por la física clásica, entonces con ordenadores cada vez más potentes, y datos iniciales cada vez más precisos sobre posiciones y velocidades, nos acercaríamos cada vez más a la respuesta exacta.

2. Al final del capítulo 4, señalé que los resultados de Bell, Aspect y otros no descartan la posibilidad de que las partículas siempre tengan posiciones y velocidades definidas, aunque no podamos determinar tales características simultáneamente. Además, la versión de Bohm de la mecánica cuántica se da cuenta explícitamente de esta posibilidad. Así, aunque la opinión ampliamente extendida de que un electrón no tiene una posición hasta que se mide es una característica estándar del enfoque convencional de la mecánica cuántica, es, en sentido estricto, demasiado fuerte como afirmación general. No obstante, hay que tener en cuenta que en el enfoque de Bohm, como veremos más adelante en este capítulo, las partículas están "acompañadas" por ondas de probabilidad; es decir, la teoría de Bohm siempre invoca las partículas *y las ondas*, mientras que el enfoque estándar prevé una complementariedad que puede resumirse aproximadamente como partículas *u ondas*. Así pues, la conclusión que perseguimos -que la descripción de la mecánica cuántica del pasado sería completamente incompleta si habláramos exclusivamente de que una partícula ha atravesado un punto único en el espacio en cada momento definido en el tiempo (lo que *haríamos* en la física clásica)- es, sin embargo, cierta. En el enfoque convencional de la mecánica cuántica, también debemos incluir la riqueza de otros lugares que una partícula podría haber ocupado en un momento dado, mientras que en el enfoque de Bohm también debemos incluir la onda "piloto", un objeto que también se extiende a través de una riqueza de otros lugares. (El lector experto debe tener en cuenta que la onda piloto es sólo la función de onda de la mecánica cuántica convencional, aunque su encarnación en la teoría de Bohm es bastante diferente). Para evitar calificaciones interminables, el debate que sigue se hará desde la perspectiva de la mecánica cuántica convencional (el enfoque más utilizado), dejando las observaciones sobre el enfoque de Bohm y otros enfoques para la última parte del capítulo.

3. Para un relato matemático pero altamente pedagógico, véase R. P. Feynman y A. R. Hibbs, *Quantum Mechanics and Path Integrals* (Burr Ridge, Ill.: McGraw-Hill Higher Education, 1965).

4. Podría estar tentado de invocar la discusión del Capítulo 3, en el que aprendimos que a la velocidad de la luz el tiempo se ralentiza hasta detenerse, para argumentar que desde la perspectiva del fotón todos los momentos son el

mismo momento, por lo que el fotón "sabe" cómo está ajustado el conmutador del detector cuando pasa por el divisor de haz. Sin embargo, estos experimentos pueden llevarse a cabo con otras especies de partículas, como los electrones, que viajan más lentamente que la luz, y los resultados no cambian. Por lo tanto, esta perspectiva no ilumina la física esencial.

5. El montaje experimental discutido, así como los resultados experimentales reales que lo confirman, provienen de Y. Kim, R. Yu, S. Kulik, Y. Shih, M. Scully, Phys. Rev. Lett, vol. 84, no. 1, pp. 1-5.

6. La mecánica cuántica también puede basarse en una ecuación equivalente presentada en una forma diferente (conocida como mecánica matricial) por Werner Heisenberg en 1925. Para el lector matemáticamente inclinado, la ecuación de Schrödinger es: *H* (*x,t*) = *i* (*d* (*x,t)*/ *dt)*, donde *H significa* el Hamiltoniano, representa la función de onda, y es la constante de Planck.

7. El lector experto notará que estoy suprimiendo un punto sutil aquí. A saber, tendríamos que tomar el complejo conjugado de la función de onda de la partícula para asegurarnos de que resuelve la versión invertida en el tiempo de la ecuación de Schrödinger. Es decir, la operación T descrita en la nota final 2 del capítulo 6 toma una función de onda (*x,t*) y la mapea a *(*x* ,- *t*). Esto no tiene un impacto significativo en la discusión del texto.

8. Bohm redescubrió y desarrolló un enfoque que se remonta al príncipe Louis de Broglie, por lo que este enfoque se denomina a veces el enfoque de de Broglie-Bohm.

9. Para el lector con inclinación matemática, el enfoque de Bohm es local en el espacio de *configuración* pero ciertamente *no local* en el espacio real. Los cambios en la función de onda en un lugar del espacio real ejercen inmediatamente una influencia en las partículas localizadas en otros lugares distantes.

10. Para un tratamiento excepcionalmente claro del enfoque Ghirardi-Rimini-Weber y su relevancia para la comprensión del entrelazamiento cuántico, véase J. S. Bell, "Are There Quantum Jumps?" en *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics* (Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1993).

11. Algunos físicos consideran que las preguntas de esta lista son subproductos irrelevantes de confusiones anteriores sobre la mecánica cuántica. La función de onda, según este punto de vista, es meramente un instrumento teórico para hacer predicciones (probabilísticas) y no se le debe conceder más que la realidad matemática (un punto de vista que a veces se llama el enfoque "Cállate y calcula", ya que alienta a utilizar la mecánica cuántica y las funciones de onda para hacer predicciones, sin pensar mucho en lo que las funciones de onda realmente significan y hacen). Una variación de este tema argumenta que las funciones de

onda nunca colapsan realmente, sino que las interacciones con el medio ambiente hacen *que parezca* que lo hacen. (Discutiremos una versión de este enfoque en breve.) Simpatizo con estas ideas y, de hecho, creo firmemente que la noción de colapso de la función de onda será finalmente eliminada. Pero no encuentro satisfactorio el primer enfoque, ya que no estoy dispuesto a renunciar a la comprensión de lo que ocurre en el mundo cuando "no estamos mirando", y el segundo -aunque, en mi opinión, la dirección correcta- necesita un mayor desarrollo matemático. El resultado final es que la medición causa algo que *es* o se parece o se disfraza *como el colapso de* la función de onda. Ya sea a través de una mejor comprensión de la influencia ambiental o a través de algún otro enfoque aún por sugerir, este aparente efecto debe ser abordado, no simplemente descartado.

12. Hay otras cuestiones controvertidas asociadas a la interpretación de Muchos Mundos que van más allá de su obvia extravagancia. Por ejemplo, existen dificultades técnicas para definir una noción de probabilidad en un contexto que implica un número infinito de copias de cada uno de los observadores cuyas mediciones se supone que están sujetas a esas probabilidades. Si un observador determinado es realmente uno de muchos ejemplares, ¿en qué sentido podemos decir que tiene una probabilidad particular de medir tal o cual resultado? ¿Quién es realmente "él" o "ella"? Cada copia del observador medirá -con una probabilidad 1- cualquier resultado previsto para la copia particular del universo en el que reside, de modo que todo el marco probabilístico requiere (y se ha dado, y sigue dándose) un escrutinio cuidadoso en el marco de los Muchos Mundos. Además, en una nota más técnica, el lector con inclinación matemática se dará cuenta de que, dependiendo de la forma en que se definan con precisión los Muchos Mundos, puede ser necesario seleccionar una base propia preferida. ¿Pero cómo se debe elegir esa base propia? Se ha discutido mucho y se ha escrito mucho sobre todas estas cuestiones, pero hasta la fecha no hay resoluciones universalmente aceptadas. El enfoque basado en la decoherencia, discutido en breve, ha arrojado mucha luz sobre estas cuestiones, y ha ofrecido una visión particular sobre la cuestión de la selección de la base propia.

13. El enfoque de Bohm o de Broglie-Bohm nunca ha recibido mucha atención. Tal vez una de las razones de ello, como señala John Bell en su artículo "The Impossible Pilot Wave", recogido en *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics,* es que ni de Broglie ni Bohm tenían especial cariño a lo que él mismo había desarrollado. Pero, como señala Bell, el enfoque de de Broglie y Bohm elimina gran parte de la vaguedad y subjetividad del enfoque más estándar. Si no por otra razón, incluso si el enfoque es erróneo, vale la pena saber que las partículas pueden tener posiciones y velocidades definidas en todo momento (que están más allá de nuestra capacidad, incluso en principio, de medir), y todavía se ajustan plenamente a las predicciones de la mecánica cuántica estándar, la incertidumbre y todo eso. Otro argumento en contra del enfoque de Bohm es que la no localidad en este marco es más "severa" que la de la mecánica cuántica

estándar. Con esto se quiere decir que el enfoque de Bohm tiene interacciones no locales (entre la función de onda y las partículas) como elemento central de la teoría desde el principio, mientras que en la mecánica cuántica la no localidad está más profundamente enterrada y surge sólo a través de correlaciones no locales entre mediciones ampliamente separadas. Pero, como han sostenido los partidarios de este enfoque, el hecho de que algo esté oculto no lo hace menos presente y, además, como el enfoque estándar es vago en lo que respecta al problema de la medición cuántica -el mismo lugar donde la no localidad se hace aparente- una vez que esa cuestión se resuelve plenamente, la no localidad puede no estar tan oculta después de todo. Otros han argumentado que hay obstáculos para hacer una versión relativista del enfoque de Bohm, aunque también se han hecho progresos en este frente (véase, por ejemplo, John Bell Beables *para la Teoría de los Campos Cuánticos,* en el volumen recopilado indicado anteriormente). Por lo tanto, definitivamente vale la pena tener en cuenta este enfoque alternativo, aunque sólo sea para evitar conclusiones precipitadas sobre lo que inevitablemente implica la mecánica cuántica. Para el lector con inclinación matemática, un tratamiento muy agradable de la teoría de Bohm y de las cuestiones de entrelazamiento cuántico se puede encontrar en Tim Maudlin, *Quantum Nonlocalityand Relativity* (Malden, Mass.: Blackwell, 2002) .

14. Para un análisis profundo, aunque técnico, de la flecha del tiempo en general, y el papel de la decoherencia en particular, véase H. D. Zeh, *The Physical Basis of the Direction of Time* (Heidelberg: Springer, 2001).

15. Para que se haga una idea de la rapidez con que se produce la decoherencia, de la rapidez con que la influencia del medio ambiente suprime la interferencia cuántica y, por tanto, convierte las probabilidades cuánticas en clásicas conocidas, aquí hay algunos ejemplos. Los números son aproximados, pero el punto que transmiten es claro. La función de onda de un grano de polvo flotando en su sala de estar, bombardeado por moléculas de aire temblorosas, se decoherirá en aproximadamente una milmillonésima de una milmillonésima de una milmillonésima (10^{-36}) de segundo. Si el grano de polvo se mantiene en una cámara de vacío perfecta y está sujeto sólo a las interacciones con la luz solar, su función de onda se decoherirá un poco más lentamente, tomando una milmillonésima de una milmillonésima (10^{-21}) de segundo. Y si el grano de polvo está flotando en las más oscuras profundidades del espacio vacío y está sujeto sólo a interacciones con los fotones de microondas del Big Bang, su función de onda se decoherirá en una millonésima de segundo. Estos números son extremadamente pequeños, lo que muestra que la decoherencia para algo tan pequeño como un grano de polvo ocurre muy rápidamente. Para objetos más grandes, la decoherencia ocurre aún más rápido. No es de extrañar que, aunque el nuestro es un universo cuántico, el mundo que nos rodea se parece a él. (Ver, por ejemplo, E. Joos, "Elementos de la Decoherencia Ambiental", en *Decoherencia: Problemas Teóricos, Experimentales y Conceptuales,* Ph.

Blanchard, D. Giulini, E. Joos, C. Kiefer, I.-O. Stamatescu, eds. (Berlín: Springer, 2000)).

Capítulo 8

1. Para ser más precisos, la simetría entre las leyes de Connecticut y las leyes de Nueva York utilizan tanto la simetría translacional *como la simetría* rotacional. Cuando actúe en Nueva York, no sólo habrá cambiado de lugar desde Connecticut, sino que es más que probable que realice sus rutinas mirando en una dirección algo diferente (este frente a norte, quizás) que durante la práctica.

2. Las leyes de movimiento de Newton suelen describirse como pertinentes para los "observadores inerciales", pero cuando se observa de cerca cómo se especifican esos observadores, suena circular: los observadores inerciales son los observadores a los que se aplican las leyes de Newton. Una buena manera de pensar en lo que realmente sucede es que las leyes de Newton llaman nuestra atención sobre una clase grande y particularmente útil de observadores: aquellos cuya descripción del movimiento encaja completa y cuantitativamente en el marco de Newton. Por definición, estos son observadores inerciales. Operacionalmente, los observadores inerciales son aquellos sobre los que no actúan fuerzas de ningún tipo, es decir, que no experimentan aceleraciones. En cambio, la relatividad general de Einstein se aplica a todos los observadores, independientemente de su estado de movimiento.

3. Si viviéramos en una época en la que *todos los* cambios se detuvieran, no experimentaríamos el paso del tiempo (todas las funciones del cuerpo y del cerebro también se congelarían). Pero si esto significaría que el bloque espacio-tiempo de la figura 5.1 llegara a su fin o, por el contrario, continuara sin cambios a lo largo del eje temporal -es decir, si el tiempo llegara a su fin o siguiera existiendo en algún tipo de sentido formal y general- es una pregunta hipotética que es a la vez difícil de responder y en gran medida irrelevante para cualquier cosa que podamos medir o experimentar. Nótese que esta situación hipotética es diferente de un estado de máximo desorden en el que la entropía no puede aumentar más, pero el cambio microscópico, como las moléculas de gas que van de un lado a otro, todavía tiene lugar.

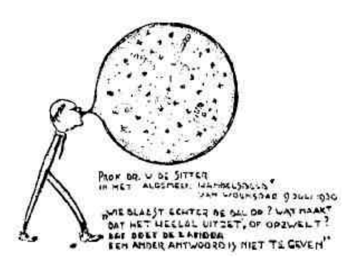
4. La radiación cósmica de microondas fue descubierta en 1964 por los científicos del Laboratorio Bell, Arno Penzias y Robert Wilson, mientras probaban una gran antena destinada a ser utilizada en las comunicaciones por satélite. Penzias y Wilson encontraron un ruido de fondo que resultó imposible de eliminar (incluso después de raspar los excrementos de pájaros -"ruido blanco"- del interior de la antena) y, con las ideas clave de Robert Dicke en Princeton y sus estudiantes Peter Roll y David Wilkinson, junto con Jim Peebles, se dio cuenta finalmente de que la antena estaba recogiendo la radiación de microondas que se originó con el big bang. (Importante trabajo en cosmología que preparó el escenario para este

descubrimiento fue llevado a cabo anteriormente por George Gamow, Ralph Alpher y Robert Herman.) Como veremos más adelante en los capítulos, la radiación nos da una imagen sin adulterar del universo cuando tenía unos 300.000 años. Eso es cuando partículas cargadas eléctricamente como electrones y protones, que interrumpen el movimiento de los rayos de luz, se combinaron para formar átomos eléctricamente neutros, que, en general, permiten que la luz viaje libremente. Desde entonces, esa antigua luz producida en las primeras etapas del universo ha viajado sin impedimentos, y hoy en día, inunda todo el espacio con fotones de microondas.

5. El fenómeno físico involucrado aquí, como se discutió en el capítulo 11, se conoce como corrimiento *al rojo.* Los átomos comunes como el hidrógeno y el oxígeno emiten luz en longitudes de onda que han sido bien documentadas a través de experimentos de laboratorio. Cuando tales sustancias son componentes de galaxias que se alejan rápidamente, la luz que emiten se alarga, como la sirena de un coche de policía que se aleja rápidamente también se alarga, haciendo que el campo de juego caiga. Debido a que el rojo es la longitud de onda más larga de la luz que se puede ver a simple vista, este estiramiento de la luz se llama el efecto de desplazamiento al rojo. La cantidad de desplazamiento al rojo crece con el aumento de la velocidad de recesión, y por lo tanto, midiendo las longitudes de onda de luz recibidas y comparándolas con los resultados de laboratorio, se puede determinar la velocidad de los objetos distantes. (Este es en realidad un tipo de desplazamiento al rojo, similar al efecto Doppler. El desplazamiento al rojo también puede ser causado por la gravedad: los fotones se alargan al salir de un campo gravitatorio).

6. Más precisamente, el lector matemáticamente inclinado observará que una partícula de masa *m, sentada* en la superficie de una bola de radio R y densidad de masa, experimenta una aceleración, d^2R/dt^2 dada por (4 /3)$R^3 G/R^2$, y así (1/R) d^2R/dt^2 = (4 /3)G. Si identificamos formalmente *R* con el radio del universo, y con la densidad de masa del universo, esta es la ecuación de Einstein para la evolución del tamaño del universo (suponiendo la ausencia de presión).

7. Véase P.J.E. Peebles, Principles of Physical Cosmology (Princeton: Princeton University Press, 1993), pág. 81.



El pie de foto dice: "Pero, ¿quién está realmente volando esta pelota? ¿Qué hace que el universo se expanda o se infle? Un Lambda hace el trabajo! No se puede dar otra respuesta". (Traducción de Koenraad Schalm.) Lambda se refiere a algo conocido como la constante cosmológica, una idea que encontraremos en el capítulo 10.

8. Para evitar confusiones, permítanme señalar que un inconveniente del modelo del centavo es que cada centavo es esencialmente idéntico a todos los demás, mientras que esto no es ciertamente cierto en el caso de las galaxias. Pero el punto es que en la mayor de las escalas, del orden de 100 millones de años-luz, se cree que las diferencias individuales entre las galaxias se promedian de modo que, cuando se analizan grandes volúmenes de espacio, las propiedades generales de cada uno de esos volúmenes son extremadamente similares a las propiedades de cualquier otro de esos volúmenes.

9. También podrías viajar hasta justo fuera del borde de un agujero negro, y permanecer allí, los motores disparando para evitar ser arrastrado. El fuerte campo gravitatorio del agujero negro se manifiesta como una severa deformación del espacio tiempo, y eso hace que tu reloj marche mucho más despacio de lo que lo haría en un lugar más ordinario de la galaxia (como en una expansión espacial relativamente vacía). De nuevo, la duración del tiempo medida por tu reloj es perfectamente válida. Pero, al igual que en la cremallera a alta velocidad, es una perspectiva completamente individualista. Cuando se analizan las características del universo en su conjunto, es más útil tener una noción ampliamente aplicable y acordada del tiempo transcurrido, y eso es lo que proporcionan los relojes que se mueven a lo largo del flujo cósmico de la expansión espacial y que están sujetos a un campo gravitatorio mucho más suave, mucho más medio.

10. El lector matemáticamente inclinado notará que la luz viaja a lo largo de la geodésica nula de la métrica del espacio tiempo, la cual, para la definición, podemos tomar como $ds^2 = dt^2 - a^2(t)(dx^2)$, donde $dx^2 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2$, y la x_i son coordenadas de desplazamiento. Fijando $ds^2 = 0$, como es apropiado para una geodésica nula, podemos escribir $_t{}^{t0}$ (dt/a(t)) para la distancia total en movimiento que la luz emitida en el tiempo t puede recorrer por el tiempo t_0. Si multiplicamos esto por el valor del factor de escala $a(t_0)$ en el tiempo t_0, entonces habremos calculado la distancia física que la luz ha recorrido en este intervalo de tiempo. Este algoritmo puede ser ampliamente utilizado para calcular cuán lejos puede viajar la luz en cualquier intervalo de tiempo dado, revelando si dos puntos en el espacio, por ejemplo, están en contacto causal. Como puedes ver, para una expansión acelerada, incluso para t_0 arbitrariamente grande, la integral está limitada, mostrando que la luz nunca alcanzará lugares de desplazamiento arbitrariamente distantes. Por lo tanto, en un universo con expansión acelerada, hay lugares con los que nunca podemos comunicarnos, y a la inversa, regiones que nunca pueden comunicarse con nosotros. Se dice que tales regiones están más allá de nuestro horizonte cósmico.

11. Al analizar las formas geométricas, los matemáticos y físicos utilizan un enfoque cuantitativo de la curvatura desarrollado en el siglo XIX, que hoy en día forma parte de un cuerpo matemático de conocimientos conocido como geometría diferencial. Una forma no técnica de pensar en esta medida de la curvatura es estudiar los triángulos dibujados en la forma de interés o dentro de ella. Si los ángulos del triángulo suman 180 grados, como lo hacen cuando se dibuja en una mesa plana, decimos que la forma es plana. Pero si los ángulos suman más o menos de 180 grados, como lo hacen cuando el triángulo se dibuja en la superficie de una esfera (la hinchazón exterior de una esfera hace que la suma de los ángulos supere los 180 grados) o en la superficie de una silla de montar (la contracción interior de la forma de una silla de montar hace que la suma de los ángulos sea inferior a 180 grados), decimos que la forma es curva. Esto se ilustra en la figura 8.6.

12. Si se pegaran los bordes verticales opuestos de un toro (lo que es razonable hacer, ya que se identifican - cuando se pasa por un borde se reaparece inmediatamente en el otro) se obtendría un cilindro. Y luego, si hicieras lo mismo con los bordes superior e inferior (que ahora tendrían forma de círculo), obtendrías una rosquilla. Por lo tanto, una rosquilla es otra forma de pensar o representar un toro. Una complicación de esta representación es que la rosquilla ya no se ve plana. Sin embargo, en realidad lo es. Usando la noción de curvatura dada en la nota final anterior, encontrarías que todos los triángulos dibujados en la superficie de la rosquilla tienen ángulos que suman 180 grados. El hecho de que la rosquilla parezca curvada es un artefacto de cómo hemos incrustado una forma bidimensional en nuestro mundo tridimensional. Por esta razón, en el contexto actual es más útil utilizar las representaciones manifiestamente no curvadas de los toros bidimensionales y tridimensionales, como se discute en el texto.

13. Noten que hemos sido flojos en la distinción de los conceptos de forma y curvatura. Hay tres tipos de *curvaturas* para un espacio completamente simétrico: positivo, cero y negativo. Pero dos formas pueden tener la misma curvatura y sin embargo no ser idénticas, siendo el ejemplo más simple la pantalla plana de vídeo y el tablero plano infinito. Por lo tanto, la simetría nos permite reducir la curvatura del espacio a tres posibilidades, pero hay algo más que tres formas para el espacio (que difieren en lo que los matemáticos llaman sus propiedades globales) que realizan estas tres curvaturas.

14. Hasta ahora, nos hemos centrado exclusivamente en la curvatura del espacio tridimensional... la curvatura de los trozos espaciales en el pan del espacio tiempo. Sin embargo, aunque es difícil de imaginar, en los tres casos de curvatura espacial (positiva, cero, negativa), todo el espacio tiempo cuatridimensional está curvado, y el grado de curvatura se hace cada vez mayor a medida que examinamos el universo cada vez más cerca del big bang. De hecho, cerca del momento del big bang, la curvatura cuatridimensional del espacio tiempo crece tanto que las

ecuaciones de Einstein se rompen. Discutiremos esto más adelante en capítulos posteriores.

Capítulo 9

1. Si se elevara mucho más la temperatura, se encontraría un cuarto estado de la materia conocido como *plasma,* en el que los átomos se desintegran en sus partículas componentes.

2. Hay sustancias curiosas, como las sales de Rochelle, que se ordenan menos a altas temperaturas y más a bajas, lo contrario de lo que normalmente esperamos.

3. Una diferencia entre los campos de fuerza y de materia se expresa en el principio de exclusión de Wolfgang Pauli. Este principio muestra que mientras que un gran número de partículas de fuerza (como los fotones) pueden combinarse para producir campos accesibles para un físico precuántico como Maxwell, campos que se ven cada vez que se entra en una habitación oscura y se enciende una luz, las partículas de materia están generalmente excluidas por las leyes de la física cuántica de cooperar de manera tan coherente y organizada. (Más precisamente, dos partículas de la misma especie, como dos electrones, están excluidas de ocupar el mismo estado, mientras que no existe tal restricción para los fotones. Así, los campos de materia no tienen generalmente una manifestación macroscópica, de tipo clásico).

4. En el marco de la teoría de los campos cuánticos, cada partícula conocida se considera una excitación de un campo subyacente asociado a la especie de la que forma parte esa partícula. Los fotones son excitaciones del campo fotónico, es decir, del campo electromagnético; un up-quark es una excitación del campo up-quark; un electrón es una excitación del campo de electrones, y así sucesivamente. De esta manera, toda la materia y todas las fuerzas se describen en un lenguaje uniforme de mecánica cuántica. Un problema clave es que ha resultado muy difícil describir todas las características cuánticas de la gravedad en este lenguaje, un tema que discutiremos en el capítulo 12.

5. Aunque el campo de Higgs lleva el nombre de Peter Higgs, otros físicos -Thomas Kibble, Philip Anderson, R. Brout y François Englert, entre otros- desempeñaron un papel fundamental en su introducción en la física y en su desarrollo teórico.

6. Tenga en cuenta que el *valor del campo viene* dado por su distancia desde el centro del cuenco, de modo que aunque el campo tenga *energía cero* cuando su valor está en el valle del cuenco (ya que la altura sobre el valle denota la energía del campo), su valor no es cero.

7. En la descripción del texto, el valor del campo de Higgs está dado por su distancia desde el centro del tazón, y por lo tanto usted puede preguntarse cómo

los puntos en el valle circular del tazón - que son todos la misma distancia desde el centro del tazón - dan lugar a cualquier pero el *mismo* valor de Higgs. La respuesta, para el lector matemáticamente inclinado, es que diferentes puntos del valle representan valores del campo de Higgs con la misma magnitud pero con diferentes fases (el valor del campo de Higgs es un número complejo).

8. En principio, hay dos conceptos de masa que entran en la física. Uno es el concepto descrito en el texto: la masa como la propiedad de un objeto que resiste la aceleración. A veces, esta noción de masa se denomina *masa inercial.* El segundo concepto de masa es el pertinente a la gravedad: la masa como la propiedad de un objeto que determina la fuerza con que será arrastrado por un campo gravitatorio de una intensidad determinada (como el de la Tierra). A veces esta noción de masa se denomina masa gravitacional. A primera vista, el campo de Higgs es relevante sólo para la comprensión de la masa inercial. Sin embargo, el principio de equivalencia de la relatividad general afirma que la fuerza sentida por el movimiento acelerado y por un campo gravitatorio son indistinguibles: son equivalentes. Y eso implica una equivalencia entre los conceptos de masa inercial y masa gravitatoria. Por lo tanto, el campo de Higgs es relevante para los dos tipos de masa que hemos mencionado ya que, según Einstein, son los mismos.

9. Agradezco a Raphael Kasper que haya señalado que esta descripción es una variación de la metáfora premiada del profesor David Miller, presentada en respuesta al desafío que el Ministro de Ciencia británico William Waldegrave planteó en 1993 a la comunidad física británica para explicar por qué el dinero de los contribuyentes debería gastarse en la búsqueda de la partícula Higgs.

10. El lector con inclinación matemática debe tener en cuenta que los fotones y los bosones W y Z se describen en la teoría electrodébil como situados en la representación conjunta del grupo SU(2) × U(1), y por lo tanto se intercambian por la acción de este grupo. Además, las ecuaciones de la teoría electrodébil poseen una simetría completa bajo esta acción de grupo y es en este sentido que describimos las partículas de fuerza como interrelacionadas. Más precisamente, en la teoría electrodébil, el fotón es una mezcla particular del bosón gauge de la simetría manifiesta U(1) y del subgrupo U(1) de SU(2); por lo tanto, está estrechamente relacionado con los bosones gauge débiles. Sin embargo, debido a la estructura del producto del grupo de simetría, los cuatro bosones (en realidad hay dos bosones W con cargas eléctricas opuestas) no se mezclan completamente bajo su acción. En cierto sentido, pues, las interacciones débiles y electromagnéticas forman parte de un único marco matemático, pero que no está tan completamente unificado como podría estarlo. Cuando se incluyen las interacciones fuertes, el grupo se incrementa al incluir un factor SU(3) - el SU(3) de "color" - y este grupo tiene *tres* factores independientes, SU(3) × SU(2) × U(1), lo que sólo resalta aún más la falta de unidad completa. Esto es parte de la motivación para la gran unificación, discutida en la siguiente sección: la gran

unificación busca un grupo único, semi-sencillo (Lie) -un grupo con un solo factor- que describe las fuerzas a escalas de energía más altas.

11. El lector con inclinación matemática debe tener en cuenta que la gran teoría unificada de Georgi y Glashow se basaba en el grupo SU(5), que incluye el SU(3), el grupo asociado a la fuerza nuclear fuerte, y también el SU(2) × U(1), el grupo asociado a la fuerza electrodébil. Desde entonces, los físicos han estudiado las implicaciones de otros posibles grandes grupos unificados, como el SO(10) y el E_6 .

Capítulo 10

1. Como hemos visto, el big bang no es una explosión que tuvo lugar en un lugar de una extensión espacial preexistente, y por eso no hemos preguntado también *dónde explotó*. La juguetona descripción de la deficiencia del big bang que hemos usado se debe a Alan Guth; ver, por ejemplo, su *The Inflationary* Universe (Reading, Eng.: Perseus Books, 1997), p. xiii.

2. El término "big bang" se utiliza a veces para denotar el evento que ocurrió en el propio tiempo-cero, trayendo el universo a la existencia. Pero como, como veremos en el próximo capítulo, las ecuaciones de la relatividad general se rompen en el tiempo cero, nadie tiene ninguna comprensión de lo que este evento realmente fue. Esta omisión es lo que hemos querido decir al decir que la teoría del big bang deja fuera el bang. En este capítulo, nos limitamos a los reinos en los que las ecuaciones no se rompen. La cosmología inflacionaria hace uso de tales ecuaciones para revelar una breve hinchazón explosiva del espacio que naturalmente tomamos como el bang que deja fuera la teoría del big bang. Ciertamente, sin embargo, este enfoque deja sin respuesta la pregunta de qué ocurrió en el momento inicial de la creación del universo, si es que realmente hubo tal momento.

3. Abraham Pais, Subtle *Is the Lord* (Oxford: Oxford University Press, 1982), p. 253.

4. Para el lector con inclinación matemática: Einstein reemplazó la ecuación original $G_{v} = 8 T_{v}$ por $G_{v} + g_{v} = 8 T_{v}$ donde es un número que denota el tamaño de la constante cosmológica.

5. Cuando me refiero a la masa de un objeto en este contexto, me refiero a la suma de la masa total de sus componentes de partículas. Si un cubo, digamos, estuviera compuesto por 1.000 átomos de oro, me estaría refiriendo a 1.000 veces la masa de un solo átomo de este tipo. Esta definición se burla de la perspectiva de Newton. Las leyes de Newton dicen que tal cubo tendría una masa que es 1.000 veces la de un solo átomo de oro, y que pesaría 1.000 veces más que un solo átomo de oro. Sin embargo, según Einstein, el peso del cubo también depende de la energía cinética de los átomos (así como de todas las demás

contribuciones a la energía del cubo). Esto se desprende de $E=mc^2$: más energía (E), independientemente de la fuente, se traduce en más masa (m). Por lo tanto, una forma equivalente de expresar el punto es que debido a que Newton no sabía sobre $E=mc^2$, su ley de la gravedad utiliza una definición de masa que pierde varias contribuciones a la energía, como la energía asociada con el movimiento.

6. La discusión aquí es sugerente de la física subyacente pero no la capta completamente. La presión ejercida por el resorte comprimido influye en la fuerza con la que la caja es empujada hacia la tierra. Pero esto se debe a que el resorte comprimido afecta a la energía total de la caja y, como se discutió en el párrafo anterior, según la relatividad general, la energía total es lo relevante. Sin embargo, el punto que estoy explicando aquí es que la presión en sí misma, no sólo por la contribución que hace a la energía total, genera la gravedad, como lo hacen la masa y la energía. Según la relatividad general, la presión gravita. Obsérvese también que la gravedad repulsiva a la que nos referimos es el campo gravitatorio *interno* que se experimenta dentro de una región del espacio bañada por algo que tiene una presión negativa más que positiva. En tal situación, la presión negativa contribuirá a que el campo gravitatorio repulsivo actúe *dentro de* la región.

7. Matemáticamente, la constante cosmológica está representada por un número, normalmente denotado por (ver nota 4). Einstein encontró que sus ecuaciones tenían perfecto sentido independientemente de si se elegía un número positivo o negativo. La discusión en el texto se centra en el caso de particular interés para la cosmología moderna (y las observaciones modernas, como se discutirá) en el que es positivo, ya que esto da lugar a una presión negativa y a una gravedad repulsiva. Un valor negativo para produce una gravedad atractiva ordinaria. Obsérvese también que, como la presión ejercida por la constante cosmológica es uniforme, esta presión no ejerce directamente ninguna fuerza: sólo las diferencias de presión, como lo que sienten los oídos cuando están bajo el agua, dan lugar a una fuerza de presión. En cambio, la fuerza ejercida por la constante cosmológica es puramente una fuerza gravitacional.

8. Los imanes familiares siempre tienen un polo norte y un polo sur. Por el contrario, las grandes teorías unificadas sugieren que puede haber partículas que son como un polo magnético puramente norte o puramente sur. Tales partículas se llaman monopolos y podrían tener un gran impacto en la cosmología estándar del big bang. Nunca han sido observadas.

9. Guth y Tye reconocieron que un campo de Higgs superenfriado actuaría como una constante cosmológica, una realización que había sido hecha antes por Martinus Veltman y otros. De hecho, Tye me ha dicho que si no fuera por el límite de páginas en *Physical Review Letters,* la revista a la que él y Guth enviaron su trabajo, no habrían llegado a una frase final señalando que su modelo implicaría un período de expansión exponencial. Pero Tye también señala que fue un logro de Guth darse cuenta de las importantes implicaciones cosmológicas de un período de expansión exponencial (que se discutirá más adelante en este y en el próximo capítulo), y por lo tanto poner la inflación en primer plano en los mapas de los cosmólogos.

En la a veces enrevesada historia de los descubrimientos, el físico ruso Alexei Starobinsky había encontrado, unos años antes, un medio diferente de generar lo que ahora llamamos expansión inflacionaria, trabajo descrito en un artículo que no era ampliamente conocido entre los científicos occidentales. Sin embargo, Starobinsky no hizo hincapié en que un período de tan rápida expansión resolvería problemas cosmológicos clave (como los problemas del horizonte y la planicie, que se discutirán en breve), lo que explica, en parte, por qué su trabajo no generó la respuesta entusiasta que recibió Guth. En 1981, el físico japonés Katsuhiko Sato también desarrolló una versión de la cosmología inflacionaria,

e incluso antes (en 1978), los físicos rusos Gennady Chibisov y Andrei Linde se toparon con la idea de la inflación, pero se dieron cuenta de que -cuando se estudiaba en detalle- ésta sufría de un problema clave (discutido en la nota 11) y por lo tanto no publicaron su trabajo.

El lector con inclinación matemática debe tener en cuenta que no es difícil ver cómo se produce la expansión acelerada. Una de las ecuaciones de Einstein es $d^{2}a/dt^{2}/a = -4/3(+ 3p)$ donde *a,* , y *p* son el factor de escala del universo (su "tamaño"), la densidad de energía y la densidad de presión, respectivamente. Observa que si el lado derecho de esta ecuación es positivo, el factor de escala crecerá a un ritmo creciente: el ritmo de crecimiento del universo se acelerará con el tiempo. Para un campo de Higgs situado en una meseta, su densidad de presión resulta ser igual a la negativa de su densidad de energía (lo mismo es cierto para una constante cosmológica), y por lo tanto el lado derecho es efectivamente positivo.

10. La física que subyace a estos saltos cuánticos es el principio de incertidumbre, tratado en el capítulo 4. Discutiré explícitamente la aplicación de la incertidumbre cuántica a los campos tanto en el Capítulo 11 como en el 12, pero para presagiar ese material, señalaré brevemente lo siguiente. El valor de un campo en un punto determinado del espacio, y la velocidad de cambio del valor del campo en ese punto, desempeñan el mismo papel para los campos que la posición y la velocidad (momento) desempeñan para una partícula. Por lo tanto, así como no podemos saber nunca tanto una posición definida como una velocidad definida para una partícula, un campo no puede tener un valor definido y una tasa de cambio definida de ese valor, en un punto dado del espacio. Cuanto más definido sea el valor del campo en un momento dado, más incierta es la tasa de cambio de ese valor, es decir, más probable es que el valor del campo cambie un momento después. Y tal cambio, inducido por la incertidumbre cuántica, es lo que quiero decir cuando me refiero a los saltos cuánticos en el valor del campo.

11. La contribución de Linde y de Albrecht y Steinhardt fue absolutamente crucial, porque el modelo original de Guth - ahora llamado inflación *antigua* - sufría de un defecto pernicioso. Recuerden que el campo de Higgs superenfriado (o, en la terminología que introducimos en breve, el campo de inflado) tiene un valor que se encarama en la protuberancia de su cuenco de energía *de manera uniforme* a través del espacio. Y así, mientras he descrito lo rápido que el campo de inflado superenfriado podría llevar el salto al valor de energía más bajo, tenemos que preguntarnos si este salto inducido por el quantum ocurriría en todas partes del espacio al mismo tiempo. Y la respuesta es que no lo haría. En su lugar, como argumentó Guth, la relajación del campo de inflado a un valor de energía cero tiene lugar por un proceso llamado nucleación de la burbuja: el inflado cae a su valor de energía cero en un punto del espacio, y esto provoca una burbuja que se extiende hacia el exterior, una cuyas paredes se mueven a la velocidad de la luz, en la que el inflado cae al valor de energía cero con el paso de la pared de la burbuja. Guth imaginó que muchas de estas burbujas, con centros aleatorios, se unirían finalmente para dar un universo con un campo de inflado de energía cero en todas partes. El problema, sin embargo, como el propio Guth se dio cuenta, era que el espacio que rodeaba las burbujas seguía estando infundido con un campo de inflado de energía no nula, por lo que tales regiones continuarían experimentando una rápida expansión inflacionaria, separando las burbujas. Por lo tanto, no había garantía de que las burbujas crecientes se encontraran unas con otras y se fusionaran en una gran extensión espacial homogénea. Además, Guth argumentó que la energía del campo de inflado no se perdía al relajarse a energía cero, sino que se convertía en partículas ordinarias de materia y radiación que habitaban el universo.

Sin embargo, para lograr un modelo compatible con las observaciones, esta conversión tendría que producir una distribución *uniforme* de la materia y la energía en todo el espacio. En el mecanismo propuesto por Guth, esta conversión se produciría mediante la colisión de las paredes de las burbujas, pero los cálculos -llevados a cabo por Guth y Erick Weinberg de la Universidad de Columbia, y también por Stephen Hawking, Ian Moss y John Steward de la Universidad de Cambridge- revelaron que la distribución resultante de la materia y la energía *no* era uniforme. Así, el modelo inflacionario original de Guth se encontró con importantes problemas de detalle.

Las ideas de Linde y de Albrecht y Steinhardt, ahora llamadas *nueva inflación,* arreglaron estos problemas molestos. Cambiando la forma del tazón de energía potencial a la de la figura 10.2, estos investigadores se dieron cuenta de que el inflado podía relajarse hasta su valor energético cero "rodando" por la colina de la energía hasta el valle, un proceso gradual y elegante que no tenía necesidad del salto cuántico de la propuesta original. Y, como mostraron sus cálculos, este rodaje algo más gradual cuesta abajo prolongó suficientemente el estallido inflacionario del espacio para que una sola burbuja creciera fácilmente lo suficiente como para abarcar todo el universo observable. Por lo tanto, en este enfoque, no hay necesidad de preocuparse por las burbujas de fusión. Lo que era de igual importancia, en lugar de convertir la energía del campo de inflado en la de las partículas y la radiación ordinarias mediante las colisiones de las burbujas, en el nuevo enfoque el inflado logró gradualmente esta conversión de energía de manera uniforme en todo el espacio mediante un proceso similar a la fricción: a medida que el campo rodaba por la colina de energía -de manera uniforme en todo el espacio- entregaba su energía "frotando" (interactuando con) campos más familiares para las partículas y la radiación. Así, la nueva inflación conservó todos los éxitos del enfoque de Guth, pero parcheó el importante problema que había encontrado.

Alrededor de un año después del importante progreso que ofrece la nueva inflación, Andrei Linde tuvo otro avance. Para que la nueva inflación tenga éxito, un número de elementos claves deben caer en su lugar: el tazón de energía potencial debe tener la forma correcta, el valor del campo de inflado debe comenzar en lo alto del tazón (y, algo más técnicamente, el valor del campo de inflado debe ser en sí mismo uniforme en una extensión espacial suficientemente grande). Mientras que es posible que el universo logre tales condiciones, Linde encontró una manera de generar una explosión inflacionaria en un entorno más simple y mucho menos artificioso. Linde se dio cuenta de que incluso con un simple cuenco de energía potencial, como el de la figura 9.1a, e incluso sin arreglar finamente el valor inicial del campo de inflado, la inflación todavía podía tener lugar de forma natural. La idea es la siguiente. Imaginemos que en el universo muy temprano, las cosas eran "caóticas", por ejemplo, imaginemos que había un campo de inflado cuyo valor rebotara aleatoriamente de un número a otro. En algunos lugares del espacio su valor podría haber sido pequeño, en otros su valor podría haber sido mediano, y en otros lugares del espacio su valor podría haber sido alto. Ahora bien, nada particularmente digno de mención habría sucedido en las regiones en que el valor del campo era pequeño o mediano. Pero Linde se dio cuenta de que algo fantásticamente interesante habría tenido lugar en regiones donde el campo de inflado hubiera alcanzado un valor alto (incluso si la región fuera pequeña, de apenas $10^{a\ 33}$ centímetros de diámetro). Cuando el valor del campo de inflado es alto -cuando está en lo alto del cuenco de energía en la figura 9.1- se establece una especie de fricción cósmica: el valor del campo trata de rodar colina abajo para reducir la energía potencial, pero su alto valor contribuye a una fuerza de resistencia de arrastre, y por lo tanto rueda muy lentamente.

Así, el valor del campo de inflado habría sido casi constante y (muy parecido a un inflado en la cima de la colina de la energía potencial en una nueva inflación) habría contribuido una energía casi constante y una presión negativa casi constante. Como ya estamos muy familiarizados, estas son las condiciones necesarias para impulsar un estallido de expansión inflacionaria. Así, sin invocar un tazón de energía potencial particularmente especial, y sin establecer el campo de inflado en una configuración especial, el entorno caótico del universo temprano podría haber dado lugar naturalmente a la expansión inflacionaria. No es sorprendente que Linde llamara a este enfoque inflación *caótica.* Muchos físicos lo consideran la realización más convincente del paradigma inflacionario.

12. Aquellos que estén familiarizados con la historia de este tema se darán cuenta de que la emoción por el descubrimiento de Guth fue generada por sus soluciones a problemas cosmológicos clave, como los problemas del horizonte y la planicie, como describimos brevemente.

13. Usted podría preguntarse si el campo de Higgs electrodependiente, o el gran campo de Higgs unificado, puede hacer el doble papel que describimos en el capítulo 9, mientras que también impulsa la expansión inflacionaria en tiempos anteriores, antes de formar un océano de Higgs. Se han propuesto modelos de este tipo, pero típicamente sufren de problemas técnicos. Las realizaciones más convincentes de la expansión inflacionaria invocan un nuevo campo de Higgs para jugar el papel del inflado.

14. Véase la nota 11 de este capítulo.

15. Por ejemplo, se puede pensar en nuestro horizonte como una gigantesca esfera imaginaria, con nosotros en su centro, que separa las cosas con las que podríamos habernos comunicado (las cosas dentro de la esfera) de las cosas con las que no podríamos habernos comunicado (las cosas más allá de la esfera), en el tiempo transcurrido desde el estallido. Hoy en día, el radio de nuestra "esfera del horizonte" es de aproximadamente 14 mil millones de años luz; al principio de la historia del universo, su radio era mucho menor, ya que había habido menos tiempo para que la luz viajara. Véase también la nota 10 del capítulo 8.

16. Aunque esta es la esencia de cómo la cosmología inflacionaria resuelve el problema del horizonte, para evitar confusiones permítanme destacar un elemento clave de la solución. Si una noche usted y un amigo están parados en un gran campo intercambiando felizmente señales de luz encendiendo y apagando linternas, note que no importa cuán rápido se den la vuelta y corran uno del otro, *siempre* podrán intercambiar posteriormente señales de luz. ¿Por qué? Bueno, para evitar recibir la luz que tu amigo brilla en tu camino, o para que tu amigo evite recibir la luz que le envías, tendrían que correr uno del otro a una velocidad mayor que la de la luz, y eso es imposible. Entonces, ¿cómo es posible que regiones del espacio que fueron capaces de intercambiar señales de luz en los primeros tiempos de la historia del universo (y por lo tanto llegar a la misma temperatura, por ejemplo) se encuentren ahora más allá del rango comunicativo de cada uno? Como el ejemplo de la linterna deja claro, debe ser que se han separado a una velocidad mayor que la de la luz. Y, de hecho, el colosal empuje hacia afuera de la gravedad repulsiva durante la fase inflacionaria *hizo* que cada región del espacio se alejara de las demás a una velocidad mucho mayor que la de la luz.

Una vez más, esto no ofrece ninguna contradicción con la relatividad especial, ya que el límite de velocidad establecido por la luz se refiere al movimiento a través del espacio, no al movimiento por la hinchazón del espacio mismo. Así que una característica novedosa e importante de la cosmología inflacionaria es que implica un corto período en el que hay una expansión superlumínica del espacio.

17. Obsérvese que el valor numérico de la densidad crítica disminuye a medida que el universo se expande. Pero el punto es que si la densidad de masa/energía real del universo es igual a la densidad crítica en un momento dado, disminuirá exactamente de la misma manera y mantendrá la igualdad con la densidad crítica en todo momento.

18. El lector matemáticamente inclinado debe notar que durante la fase inflacionaria, el tamaño de nuestro horizonte cósmico permaneció fijo mientras el espacio se hinchaba enormemente (como puede verse fácilmente tomando una forma exponencial para el factor de escala en la nota 10 del capítulo 8). Ese es el sentido en el que nuestro universo observable es una pequeña mancha en un cosmos gigantesco, en el marco de la inflación.

19. R. Preston, *First Light* (Nueva York: Random House Trade Paperbacks, 1996), pág. 118.

20. Para un excelente relato a nivel general de la materia oscura, ver L. Krauss, Quintes *sence:El Misterio de la Masa Perdida en el Universo* (New York: Basic Books, 2000).

21. El lector experto reconocerá que no estoy distinguiendo entre los diversos problemas de la materia oscura que surgen en diferentes escalas de observación (galáctica, cósmica), ya que la contribución de la materia oscura a la densidad de masa cósmica es mi única preocupación aquí.

22. En realidad hay cierta controversia sobre si este es el mecanismo que está detrás de todas las supernovas de tipo Ia (agradezco a D. Spergel que me lo haya señalado), pero la uniformidad de estos eventos -que es lo que necesitamos para la discusión- está en una base de observación fuerte.

23. Es interesante observar que, años antes de que se produjeran los resultados de la supernova, los trabajos teóricos proféticos de Jim Peebles en Princeton, y también de Lawrence Krauss de Case Western y Michael Turner de la Universidad de Chicago, y Gary Steigman del Estado de Ohio, habían sugerido que el universo podría tener una pequeña constante cosmológica distinta de cero. En ese momento, la mayoría de los físicos no tomaron esta sugerencia demasiado en serio, pero ahora, con los datos de las supernovas, la actitud ha cambiado significativamente. También hay que tener en cuenta que antes en el capítulo vimos que el empuje hacia afuera de una constante cosmológica puede ser imitado por un campo de Higgs que, como la rana en la meseta, está situado por encima de su configuración de energía mínima. Así que, mientras que una constante cosmológica se ajusta bien a los datos, una afirmación más precisa es que los investigadores de las supernovas concluyeron que el espacio debe ser llenado con algo *como* una constante cosmológica que genera un empuje hacia afuera. (Hay formas en las que un campo de Higgs puede ser hecho para generar un empuje hacia afuera de larga duración, a diferencia del breve estallido hacia afuera en los primeros momentos de la cosmología inflacionaria. Discutiremos esto en el capítulo 14, cuando consideremos la cuestión de si los datos requieren realmente una constante cosmológica, o si alguna otra entidad con consecuencias gravitatorias similares puede encajar en la cuenta).

Los investigadores a menudo utilizan el término "energía oscura" como una frase general para un ingrediente del universo que es invisible a la vista pero que hace que cada región del espacio empuje, en lugar de tirar, sobre cada una de las otras.

24. La energía oscura es la explicación más aceptada para la expansión acelerada observada, pero se han planteado otras teorías. Por ejemplo, algunos han sugerido que los datos pueden explicarse si la fuerza de gravedad se desvía de la fuerza habitual prevista por la física de Newton y Einstein cuando las escalas de distancia implicadas son extremadamente grandes - de tamaño cosmológico. Otros aún no están convencidos de que los datos muestren la aceleración cósmica, y están esperando que se lleven a cabo mediciones más precisas. Es importante tener en cuenta estas ideas alternativas, especialmente si las observaciones futuras dan resultados que pongan en tensión las explicaciones actuales. Pero actualmente existe un amplio consenso en que las explicaciones teóricas descritas en el texto principal son las más convincentes.

Capítulo 11

1. Entre los líderes a principios de los años ochenta en la determinación de cómo las fluctuaciones cuánticas producirían inhomogeneidades estaban Stephen Hawking, Alexei Starobinsky, Alan Guth, So-Young Pi, James Bardeen, Paul Steinhardt, Michael Turner, Viatcheslav Mukhanov, y Gennady Chibisov.

2. Incluso con la discusión en el texto principal, puede que todavía estés desconcertado sobre cómo una pequeña cantidad de masa/energía en una pepita inflable puede producir la enorme cantidad de masa/energía que constituye el universo observable. ¿Cómo puedes acabar con más masa/energía de la que tenías al principio? Bueno, como se explica en el texto principal, el campo de inflado, en virtud de su presión negativa, "extrae" energía de la gravedad. Esto significa que a medida que la energía en el campo de inflado aumenta, la energía en el campo gravitacional disminuye. La característica especial del campo gravitatorio, conocida desde los días de Newton, es que su energía puede volverse arbitrariamente negativa. Por lo tanto, la gravedad es como un banco que está dispuesto a prestar cantidades ilimitadas de dinero - la gravedad encarna un suministro esencialmente ilimitado de energía, que el campo de inflado extrae a medida que el espacio se expande.

La masa y el tamaño particulares de la pepita inicial del campo de inflado uniforme dependen de los detalles del modelo de cosmología inflacionaria que se estudia (más notablemente, de los detalles precisos del tazón de energía potencial del campo de inflado). En el texto, he imaginado que la densidad de energía del campo de inflado inicial era de unos 10^{82} gramos por centímetro cúbico, de modo que un volumen de $(10^{-26 \text{ centímetros}})^{3} = 10^{-78}$ centímetros cúbicos tendría una masa total de unos 10 kilogramos, es decir, unas 20 libras. Estos valores son típicos de una clase bastante convencional de modelos inflacionarios, pero sólo pretenden dar una idea aproximada de los números involucrados. Para dar una idea de la gama de posibilidades, permítanme señalar que en los caóticos modelos de inflación de Andrei Linde (ver nota 11 del Capítulo 10), nuestro universo observable habría surgido de una pepita inicial de tamaño aún más pequeño, de $10^{a\ 33}$ centímetros de diámetro (la llamada longitud de Planck), cuya densidad de energía era aún mayor, unos 10^{94} gramos por centímetro cúbico, combinándose para dar una masa total menor de unos 10^{-5} gramos (la llamada masa de Planck).

En estas realizaciones de la inflación, la pepita inicial habría pesado tanto como un grano de polvo.

3. Véase Paul Davies, "Inflación y asimetría del tiempo en el universo", en *Nature, vol*. 301,
p. 398; Don Page, "La inflación no explica la asimetría del tiempo", en *Nature,* vol. 304, pág. 39; y Paul Davies, "La inflación en el universo y la asimetría del tiempo", en *Nature,* vol. 312, pág. 524.

4. Para explicar el punto esencial, es conveniente dividir la entropía en una parte debida al espacio tiempo y a la gravedad, y una parte restante debida a todo lo demás, ya que esto capta intuitivamente las ideas clave. Sin embargo, debo señalar que resulta difícil dar un tratamiento matemáticamente riguroso en el que la contribución gravitatoria a la entropía sea identificada, separada y contabilizada limpiamente. No obstante, esto no compromete las conclusiones cualitativas a las que llegamos. En caso de que esto le resulte problemático, observe que todo el debate puede reformularse en gran medida sin hacer referencia a la entropía gravitatoria. Como destacamos en el capítulo 6, cuando la gravedad de atracción ordinaria es relevante, la materia cae junta en grupos. Al hacerlo, la materia convierte la energía potencial gravitatoria en energía cinética que, posteriormente, se convierte parcialmente en radiación que emana del propio cúmulo. Se trata de una secuencia de acontecimientos que aumenta la entropía (las velocidades medias de las partículas más grandes aumentan el volumen del espacio de fase pertinente; la producción de radiación mediante interacciones aumenta el número total de partículas -ambas aumentan la entropía general). De esta manera, lo que en el texto denominamos *entropía gravitatoria* puede reformularse como *entropía de la materia generada por la fuerza gravitatoria.* Cuando decimos que la entropía gravitatoria es baja, queremos decir que la fuerza gravitatoria tiene el potencial de generar cantidades significativas de entropía a través de la aglomeración de materia. Al realizar tal potencial de entropía, los cúmulos de materia crean un campo gravitatorio no uniforme y no homogéneo -warpas y ondas en el espacio tiempo- que, en el texto, he descrito como que tiene una entropía mayor. Pero como esta discusión deja claro, realmente se puede pensar que la materia en forma de grumos (y la radiación producida en el proceso) tiene mayor entropía (que cuando está uniformemente dispersa). Esto es bueno, ya que el lector experto observará que si consideramos un fondo gravitatorio clásico (un espaciotiempo clásico) como un estado coherente de gravitones, es un estado esencialmente único y, por lo tanto, tiene baja entropía. Sólo mediante un grano grueso adecuado sería posible una asignación de entropía. Sin embargo, como se destaca en esta nota, esto no es particularmente necesario. Por otra parte, si la materia se agrupa lo suficiente como para crear agujeros negros, entonces se dispondrá de una asignación de entropía incuestionable: el área del horizonte de sucesos del agujero negro (como se explica más adelante en el capítulo 16) es una medida de la entropía del agujero negro. Y esta entropía puede llamarse inequívocamente entropía gravitacional.

5. Así como es posible que un huevo se rompa y que los trozos de cáscara de huevo rotos se vuelvan a ensamblar en un huevo prístino, es posible que las fluctuaciones inducidas por el quantum se conviertan en inhomogeneidades mayores (como hemos descrito) o que inhomogeneidades suficientemente correlacionadas trabajen en conjunto para suprimir dicho crecimiento. Por lo tanto, la contribución inflacionaria a la resolución de la flecha del tiempo también requiere fluctuaciones cuánticas iniciales suficientemente no correlacionadas.

De nuevo, si pensamos de manera similar a Boltzmann, entre todas las fluctuaciones que producen condiciones propicias para la inflación, tarde o temprano habrá una que también cumpla esta condición, permitiendo que el universo tal como lo conocemos se inicie.

6. Hay algunos físicos que afirman que la situación es mejor que la descrita. Por ejemplo, Andrei Linde argumenta que en la inflación caótica (ver nota 11, Capítulo 10), el universo observable surgió de una pepita del tamaño de Planck que contenía un campo de inflado uniforme con densidad de energía a escala de Planck. Bajo ciertas suposiciones, Linde argumenta además que la entropía de un campo de inflado *uniforme* en una pepita tan pequeña es aproximadamente igual a la entropía de cualquier otra configuración de campo de inflado, y por lo tanto las condiciones necesarias para lograr la inflación no eran especiales. La entropía de la pepita de Planck era pequeña pero a la par con la posible entropía que la pepita de Planck *podría* haber tenido. El estallido inflacionario subsiguiente creó entonces, en un instante, un enorme universo con una entropía enormemente más alta, pero que, debido a su suave y uniforme distribución de la materia, también estaba enormemente lejos de la entropía que podría haber tenido. La flecha del tiempo apunta en la dirección en la que esta brecha de entropía se está reduciendo.

Aunque soy parcial a esta visión optimista, hasta que tengamos una mejor comprensión de la física de la que se supone que la inflación ha surgido, se justifica la precaución. Por ejemplo, el lector experto observará que este enfoque hace suposiciones favorables pero injustificadas sobre los modos de campo de alta energía (transplanckianos), modos que pueden afectar al inicio de la inflación y que juegan un papel crucial en la formación de estructuras.

Capítulo 12

1. Las pruebas circunstanciales que tengo en mente aquí se basan en el hecho de que las fuerzas de las tres fuerzas no gravitacionales dependen de la energía y la temperatura del entorno en el que actúan las fuerzas. A bajas energías y temperaturas, como las de nuestro entorno cotidiano, las fuerzas de las tres fuerzas son diferentes. Pero hay pruebas teóricas y experimentales indirectas de que a temperaturas muy altas, como las que se produjeron en los primeros momentos del universo, las fuerzas de las tres fuerzas convergen, lo que indica, aunque indirectamente, que las tres fuerzas en sí mismas pueden estar fundamentalmente unificadas, y parecer distintas sólo a bajas energías y temperaturas. Para una discusión más detallada ver, por ejemplo, *El Universo Elegante,* Capítulo 7.

2. Una vez que sabemos que un campo, como cualquiera de los campos de fuerza conocidos, es un ingrediente en la composición del cosmos, entonces sabemos que existe en todas partes, está cosido en el tejido del cosmos. Es imposible eliminar el campo, así como es imposible eliminar el espacio mismo. Lo más cercano que podemos llegar a eliminar la presencia de un campo, por lo tanto, es hacer que tome un valor que minimice su energía. Para los campos de fuerza, como la fuerza electromagnética, ese valor es cero, como se discute en el texto. Para los campos como el inflado o el campo Higgs de modelo estándar (que, por simplicidad, no consideramos aquí), ese valor puede ser algún número distinto de cero que depende de la forma precisa de la energía potencial del campo, como discutimos en los capítulos 9 y 10.

Como se menciona en el texto, para mantener el debate racionalizado sólo estamos discutiendo explícitamente las fluctuaciones cuánticas de los campos cuyo estado de energía más bajo se alcanza cuando su valor es cero, aunque las fluctuaciones asociadas con los campos de Higgs o de inflado no requieren ninguna modificación de nuestras conclusiones.

3. En realidad, el lector con inclinación matemática debería notar que el principio de incertidumbre dicta que las fluctuaciones de energía son inversamente proporcionales a la resolución temporal de nuestras mediciones, por lo que cuanto más fina sea la resolución temporal con la que examinamos la energía de un campo, más salvajemente ondulará el campo.

4. En este experimento, Lamoreaux verificó la fuerza de Casimir en un montaje modificado que implicaba la atracción entre una lente esférica y una placa de cuarzo. Más recientemente, Gianni Carugno, Roberto Onofrio, y sus colaboradores de la Universidad de Padua han emprendido el experimento más difícil que involucra la estructura original de Casimir de dos placas paralelas. (Mantener las placas perfectamente paralelas es todo un reto experimental.) Hasta ahora, han confirmado las predicciones de Casimir a un nivel del 15 por ciento.

5. En retrospectiva, estos conocimientos también muestran que si Einstein no hubiera introducido la constante cosmológica en 1917, los físicos cuánticos habrían introducido su propia versión unas décadas más tarde. Como recordarán, la constante cosmológica era una energía que Einstein imaginaba que impregnaba todo el espacio, pero cuyo origen él -y los defensores actuales de una constante cosmológica- no se ha especificado. Ahora nos damos cuenta de que la física cuántica impregna el espacio vacío con campos temblorosos, y como vemos directamente por el descubrimiento de Casimir, el frenesí de campo microscópico resultante llena el espacio con energía. De hecho, uno de los principales desafíos a los que se enfrenta la física teórica es demostrar que la contribución combinada de todos los campos de temblor produce una energía total en el espacio vacío -una constante cosmológica total- que está dentro del límite de observación actualmente determinado por las observaciones de supernovas comentadas en el Capítulo 10. Hasta ahora, nadie ha sido capaz de hacerlo; la realización del análisis con exactitud ha demostrado estar más allá de la capacidad de los métodos teóricos actuales, y los cálculos aproximados han obtenido respuestas *muy* superiores a las que permiten las observaciones, lo que sugiere claramente que las aproximaciones están muy lejos. Muchos consideran que explicar el valor de la constante cosmológica (ya sea cero, como se pensó durante mucho tiempo, o pequeña y distinta de cero como sugieren los datos de la inflación y de las supernovas) es uno de los problemas abiertos más importantes de la física teórica.

6. En esta sección, describo una forma de ver el conflicto entre la relatividad general y la mecánica cuántica. Pero debo señalar, de acuerdo con nuestro tema de búsqueda de la verdadera naturaleza del espacio y el tiempo, que otros rompecabezas, algo menos tangibles pero potencialmente importantes, surgen al intentar fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica. Uno que es particularmente tentador surge cuando la aplicación directa del procedimiento para transformar las teorías no gravitacionales clásicas (como la electrodinámica de Maxwell) en una teoría cuántica se extiende a la relatividad general clásica (como lo demuestra Bryce DeWitt en lo que ahora se llama la ecuación de Wheeler-DeWitt). En la ecuación central que surge, resulta que la variable de tiempo no aparece. Así pues, en lugar de tener una representación matemática explícita del tiempo -como ocurre en todas las demás teorías fundamentales- en este enfoque de la cuantificación de la gravedad, la evolución temporal debe ser seguida por

una característica física del universo (como su densidad) que esperamos que cambie de manera regular.

Hasta ahora, nadie sabe si este procedimiento para cuantificar la gravedad es apropiado (aunque recientemente se han logrado muchos avances en una rama de este formalismo, llamada *gravedad cuántica* de *bucle*; véase el capítulo 16), por lo que no está claro si la ausencia de una variable temporal explícita está insinuando algo profundo (¿el tiempo como concepto emergente?) o no. En este capítulo nos centramos en un enfoque diferente para fusionar la relatividad general y la mecánica cuántica, la teoría *de las supercuerdas.*

7. Es un nombre un tanto equivocado hablar del "centro" de un agujero negro como si fuera un lugar en el espacio. La razón, a grandes rasgos, es que cuando uno cruza el horizonte de sucesos de un agujero negro - su borde exterior - los roles del espacio y el tiempo se intercambian. De hecho, así como no puedes resistirte a ir de un segundo al siguiente en el tiempo, tampoco puedes resistirte a ser arrastrado al "centro" del agujero negro una vez que has cruzado el horizonte de sucesos. Resulta que esta analogía entre ir hacia adelante en el tiempo y hacia el centro de un agujero negro está fuertemente motivada por la descripción matemática de los agujeros negros. Por lo tanto, en lugar de pensar en el centro del agujero negro como una ubicación en el espacio, es mejor pensar en él como una ubicación en el tiempo. Además, como no puedes ir más allá del centro del agujero negro, podrías estar tentado a pensar en él como un lugar en el espacio tiempo donde el tiempo llega a su fin. Esto bien podría ser cierto. Pero como las ecuaciones estándar de la relatividad general se rompen bajo tales extremos de enorme densidad de masa, nuestra capacidad para hacer afirmaciones definitivas de este tipo se ve comprometida. Claramente, esto sugiere que si tuviéramos ecuaciones que no se rompieran en lo profundo de un agujero negro, podríamos obtener importantes conocimientos sobre la naturaleza del tiempo. Ese es uno de los objetivos de la teoría de supercuerdas.

8. Como en los capítulos anteriores, por "universo observable" me refiero a la parte del universo con la que podríamos haber tenido, al menos en principio, comunicación durante el tiempo transcurrido desde el estallido. En un universo que es infinito en extensión espacial, como se discutió en el capítulo 8, todo el espacio *no* se reduce a un punto en el momento del bang. Ciertamente, todo en la parte observable del universo será comprimido en un espacio cada vez más pequeño a medida que volvamos al principio, pero, aunque es difícil de imaginar, hay cosas -infinitamente lejanas- que permanecerán por siempre separadas de nosotros, incluso cuando la densidad de la materia y la energía sea cada vez mayor.

9. Leonard Susskind, en "El Universo Elegante", *NOVA,* serie PBS de tres horas de duración emitida por primera vez el 28 de octubre y el 4 de noviembre de 2003.

10. De hecho, la dificultad de diseñar pruebas experimentales para la teoría de las supercuerdas ha sido un obstáculo crucial, que ha dificultado sustancialmente la aceptación de la teoría. Sin embargo, como veremos en capítulos posteriores, se ha avanzado mucho en esta dirección; los teóricos de las cuerdas tienen grandes esperanzas de que los próximos experimentos con aceleradores y basados en el espacio proporcionen al menos pruebas circunstanciales en apoyo de la teoría, y con suerte, tal vez incluso más.

11. Aunque no lo he tratado explícitamente en el texto, tenga en cuenta que cada partícula conocida tiene una *antipartícula* - una partícula con la misma masa pero con cargas de fuerza opuesta (como el signo opuesto de la carga eléctrica).

La antipartícula del electrón es el positrón; la antipartícula del quark up- es, no es sorprendente, el antiquark up; y así sucesivamente.

12. Como veremos en el Capítulo 13, los recientes trabajos sobre la teoría de las cuerdas han sugerido que las cuerdas pueden ser mucho más grandes que la longitud de Planck, y esto tiene una serie de implicaciones potencialmente críticas, incluida la posibilidad de hacer que la teoría sea comprobable experimentalmente.

13. La existencia de los átomos se argumentó inicialmente por medios indirectos (como una explicación de las proporciones particulares en las que se combinarían varias sustancias químicas, y más tarde, a través del movimiento Browniano); la existencia de los primeros agujeros negros se confirmó (para satisfacción de muchos físicos) al ver su efecto en el gas que cae hacia ellos desde las estrellas cercanas, en lugar de "verlos" directamente.

14. Dado que incluso una cuerda que vibra plácidamente tiene *cierta* cantidad de energía, te preguntarás cómo es posible que un patrón de vibración de cuerda produzca una partícula sin masa. La respuesta, una vez más, tiene que ver con la incertidumbre cuántica. No importa lo plácida que sea una cuerda, la incertidumbre cuántica implica que tiene una cantidad mínima de sacudidas y sacudidas. Y, a través de lo extraño de la mecánica cuántica, estos temblores inducidos por la incertidumbre tienen una energía negativa. Cuando esto se combina con la energía positiva de la más suave de las vibraciones de cuerda ordinarias, la masa/energía total es cero.

15. Para el lector matemáticamente inclinado, la afirmación más precisa es que el *cuadrado* de las masas de los modos vibratorios de las cuerdas viene dado por múltiplos enteros del cuadrado de la masa de Planck. Aún más precisamente (y de relevancia para los recientes desarrollos tratados en el Capítulo 13), el cuadrado de estas masas son múltiplos enteros de la *escala de cuerdas* (que es proporcional al cuadrado inverso de la longitud de la cuerda). En las formulaciones convencionales de la teoría de las cuerdas, la escala de las cuerdas y la masa de Planck están muy próximas, por lo que he simplificado el texto principal y sólo he introducido la masa de Planck. Sin embargo, en el capítulo 13 consideraremos situaciones en las que la escala de cuerdas puede ser diferente de la masa de Planck.

16. No es muy difícil entender, en términos generales, cómo la longitud de Planck se deslizó en el análisis de Klein. La relatividad general y la mecánica cuántica invocan tres constantes fundamentales de la naturaleza: *c* (la velocidad de la luz), *G* (la fuerza básica de la fuerza gravitatoria) y (la constante de Planck que describe el tamaño de los efectos cuánticos). Estas tres constantes pueden combinarse para producir una cantidad con unidades de longitud: $(G/c^3)^{1/2}$, que, por definición, es la longitud de Planck. Después de sustituir los valores numéricos de las tres constantes, se encuentra que la longitud de Planck es de aproximadamente $1{,}616 \times 10^{-33}$ centímetros. Así pues, a menos que de la teoría surja un número adimensional cuyo valor difiera sustancialmente de 1 -algo que no ocurre a menudo en una teoría física simple y bien formulada- esperamos que la longitud de Planck sea el tamaño característico de las longitudes, como la longitud de la dimensión espacial acurrucada. Sin embargo, nótese que esto no descarta la posibilidad de que las dimensiones puedan ser más grandes que la longitud de Planck, y en el Capítulo 13 veremos interesantes trabajos recientes que han investigado esta posibilidad vigorosamente.

17. La incorporación de una partícula con la carga del electrón, y con su masa relativamente pequeña, resultó ser un desafío formidable.

18. Obsérvese que el requisito de simetría uniforme que utilizamos en el Capítulo 8 para reducir la forma del universo fue motivado por las observaciones astronómicas (como las de la radiación de fondo de microondas) dentro de las *tres grandes dimensiones.* Estas limitaciones de simetría no tienen ninguna relación con la forma de las posibles seis diminutas dimensiones del espacio extra. La figura 12.9a se basa en una imagen creada por Andrew Hanson.

19. Podrías preguntarte si no sólo podría haber dimensiones extra espaciales, sino también extra temporales. Investigadores (como los Itzhak Bars de la Universidad del Sur de California) han investigado esta posibilidad, y han demostrado que es al menos posible formular teorías con una segunda dimensión de tiempo que parecen ser físicamente razonables. Pero si esta segunda dimensión de tiempo está realmente a la par con la dimensión de tiempo ordinaria o es sólo un dispositivo matemático, nunca se ha establecido completamente; el sentimiento general es más hacia la segunda que hacia la primera. Por el contrario, la lectura más directa de la teoría de las cuerdas dice que las dimensiones espaciales adicionales son tan reales como las tres que conocemos.

20. Los expertos en teoría de cuerdas (y aquellos que han leído *El Universo Elegante,* Capítulo 12) reconocerán que la afirmación más precisa es que ciertas formulaciones de la teoría de cuerdas (discutidas en el Capítulo 13 de este libro) admiten límites que implican once dimensiones de espacio tiempo. Aún existe un debate sobre si es mejor pensar que la teoría de cuerdas es fundamentalmente una teoría de once dimensiones de espacio tiempo, o si la formulación de once dimensiones debe considerarse como un límite particular (por ejemplo, cuando la constante de acoplamiento de las cuerdas se considera grande en la formulación del Tipo IIA), a la par de otros límites. Como esta distinción no tiene mucho impacto en nuestro debate a nivel general, he elegido el primer punto de vista, en gran medida por la facilidad lingüística de tener un número total fijo y uniforme de dimensiones.

Capítulo 13

1. Para el lector con inclinación matemática: Me refiero a la simetría *conformacional* - simetría bajo transformaciones de ángulos arbitrarios - que preservan el volumen en el espacio tiempo barrido por el constituyente fundamental propuesto. Las cuerdas barren las superficies bidimensionales del espacio-tiempo, y las ecuaciones de la teoría de cuerdas son invariables bajo el grupo conformado bidimensional, que es un grupo de simetría dimensional infinita. Por el contrario, en otros números de dimensiones espaciales, asociadas con objetos que no son en sí mismos unidimensionales, el grupo conformado es de dimensiones finitas.

2. Muchos físicos contribuyeron de manera significativa a estos desarrollos, tanto al sentar las bases como al realizar descubrimientos de seguimiento: Michael Duff, Paul Howe, Takeo Inami, Kelley Stelle, Eric Bergshoeff, Ergin Szegin, Paul Townsend, Chris Hull, Chris Pope, John Schwarz, Ashoke Sen, Andrew Strominger, Curtis Callan, Joe Polchinski, Petr Ho ava, J. Dai, Robert Leigh, Hermann Nicolai y Bernard deWit, entre muchos otros.

3. De hecho, como se explica en el capítulo 12 de *El Universo Elegante,* hay una conexión aún más estrecha entre la décima dimensión espacial que se ha pasado por alto y las *p*- branas. Al aumentar el tamaño de la décima dimensión espacial en, digamos, la formulación del tipo IIA, las cuerdas unidimensionales se estiran en membranas bidimensionales parecidas a un tubo interior. Si asumes que la décima dimensión es muy pequeña, como siempre se había hecho implícitamente antes de estos descubrimientos, los tubos internos se ven y se comportan como cuerdas. Como en el caso de las cuerdas, la pregunta de si estas recién descubiertas branas son indivisibles o, en cambio, están hechas de componentes aún más finos, sigue sin respuesta. Los investigadores están abiertos a la posibilidad de que los ingredientes hasta ahora identificados en la teoría de las cuerdas no pongan fin a la búsqueda de *los* componentes elementales del universo. Sin embargo, también es posible que lo hagan. Dado que gran parte de lo que sigue es insensible a este tema, adoptaremos la perspectiva más simple e imaginaremos que todos los ingredientes -cuerdas y salvas de varias dimensiones- son fundamentales. ¿Y qué hay del razonamiento anterior, que sugería que los objetos fundamentales de dimensiones superiores no podían ser incorporados en un marco físicamente sensible? Bueno, ese razonamiento se basaba en otro esquema de aproximación mecánica cuántica, que es estándar y está totalmente probado en la batalla, pero que, como cualquier aproximación, tiene limitaciones. Aunque los investigadores todavía tienen que descubrir todas las sutilezas asociadas con la incorporación de objetos de dimensiones superiores en una teoría cuántica, estos ingredientes encajan tan perfecta y consistentemente dentro de las cinco formulaciones de cuerda que casi todo el mundo cree que las temidas violaciones de los principios físicos básicos y sagrados están ausentes.

4. De hecho, podríamos estar viviendo en una brana de dimensiones aún más altas (una brana de cuatro, una de cinco...) tres de cuyas dimensiones llenan el espacio ordinario, y cuyas otras dimensiones llenan algunas de las dimensiones más pequeñas y extras que requiere la teoría.

5. El lector con inclinación matemática debe tener en cuenta que durante muchos años los teóricos de cuerdas han sabido que las cuerdas cerradas respetan algo llamado dualidad T (como se explica más adelante en el Capítulo 16, y en el Capítulo 10 de *El Universo Elegante*). Básicamente, la dualidad T es la afirmación de que si una dimensión adicional debe tener la forma de un círculo, la teoría de cuerdas es completamente insensible a si el radio del círculo es R o $1/R$. La razón es que las cuerdas pueden moverse alrededor del círculo ("modos de impulso") y/o enrollarse alrededor del círculo ("modos de enrollamiento") y, con la sustitución de R por $1/R$, los físicos se han dado cuenta de que los papeles de estos dos modos simplemente se intercambian, manteniendo inalteradas las propiedades físicas generales de la teoría. Esencial para este razonamiento es que las cuerdas son bucles cerrados, ya que si están abiertas no hay una noción topológicamente estable de su devanado alrededor de una dimensión circular. Así que, a primera vista, parece que las cuerdas abiertas y cerradas se comportan de forma completamente diferente bajo la dualidad T. Con una inspección más cercana, y haciendo uso de las condiciones límite de Dirichlet para las cuerdas abiertas (la "D" en las bridas D), Polchinski, Dai, Leigh, así como Ho ava, Green y otros investigadores resolvieron este rompecabezas.

6. Las propuestas que han tratado de evitar la introducción de la materia oscura o la energía oscura han sugerido que incluso el comportamiento aceptado de la gravedad a gran escala puede diferir de lo que Newton o Einstein habrían pensado, y de esa manera tratar de explicar los efectos gravitatorios incompatibles con sólo el material que podemos ver.

Hasta ahora, estas propuestas son muy especulativas y tienen poco apoyo, ya sea experimental o teórico.

7. Los físicos que introdujeron esta idea son S. Giddings y S. Thomas, y S. Dimopoulus y G. Landsberg.

8. Obsérvese que la fase de contracción de un universo tan rebotante no es la misma que la fase de expansión que se desarrolla en sentido inverso. Los procesos físicos como el salpicado de huevos y el derretimiento de velas ocurrirían en la dirección temporal habitual "hacia adelante" durante las fases de expansión y continuarían haciéndolo durante la fase de contracción subsiguiente. Por eso la entropía aumentaría durante ambas fases.

9. El lector experto observará que el modelo cíclico puede ser redactado en el lenguaje de la teoría de campo efectiva cuatridimensional en una de las tres ramas, y en esta forma comparte muchas características con los modelos inflacionarios más familiares de campo escalar. Cuando digo "mecanismo radicalmente nuevo", me refiero a la descripción conceptual en términos de colisión de ramas, que en sí misma es una nueva y sorprendente forma de pensar sobre la cosmología.

10. No te confundas en el recuento de dimensiones. Las dos tres brunas, junto con el intervalo de espacio entre ellas, tienen cuatro dimensiones. El tiempo lo lleva a cinco. Eso deja seis más para el espacio de Calabi-Yau.

11. Una importante excepción, mencionada al final de este capítulo y analizada con más detalle en el capítulo 14, tiene que ver con las inhomogeneidades en el campo gravitatorio, las llamadas ondas gravitatorias primordiales. La cosmología inflacionaria y el modelo cíclico difieren a este respecto, una forma en la que existe la posibilidad de que se distingan experimentalmente.

12. La mecánica cuántica asegura que siempre hay una probabilidad distinta de cero de que una fluctuación fortuita interrumpa el proceso cíclico (por ejemplo, una brana se retuerce en relación con la otra), haciendo que el modelo se detenga. Incluso si la probabilidad es minúscula, tarde o temprano se producirá con seguridad, y por lo tanto los ciclos no pueden continuar indefinidamente.

Capítulo 14

1. A. Einstein, 'Quarterly Journal of Forensic Medicine and Public Sanitation' 44 37 (1912). D. Brill y J. Cohen, *Phys. Rev*. vol. 143, no. 4, 1011 (1966); H. Pfister y K. Braun, Clase. Quantum Grav. 2, 909 (1985).

2. En las cuatro décadas desde la propuesta inicial de Schiff y Pugh, se han llevado a cabo otras pruebas de arrastre de marco. Estos experimentos (llevados a cabo, entre otros, por Bruno Bertotti, Ignazio Ciufolini y Peter Bender; e I. I. Shapiro, R. D. Reasenberg,
J. F. Chandler, y R. W. Babcock) han estudiado el movimiento de la luna así como los satélites que orbitan la tierra, y encontraron algunas pruebas de efectos de arrastre de cuadros. Una ventaja importante de la sonda de gravedad B es que es el primer experimento completamente contenido, uno que está bajo el control total de los experimentadores, y por lo tanto debe dar la evidencia más precisa y más directa para el arrastre de cuadros.

3. Aunque son efectivas para dar una idea del descubrimiento de Einstein, otra limitación de las imágenes estándar del espacio deformado es que no ilustran la deformación del tiempo. Esto es importante porque la relatividad general muestra que para un objeto ordinario como el sol, en contraposición a algo extremo como un agujero negro, la deformación del tiempo (cuanto más cerca del sol, más lentamente funcionarán los relojes) es mucho más pronunciada que la deformación del espacio. Es más sutil representar gráficamente la deformación del tiempo y es más difícil transmitir cómo el tiempo deformado contribuye a las trayectorias espaciales curvas, como la órbita elíptica de la Tierra alrededor del sol, y por eso la Figura 3.10 (y casi todos los intentos de visualizar la relatividad general que he visto) se centra únicamente en el espacio deformado. Pero es bueno tener en cuenta que en muchos entornos astrofísicos comunes, es el alabeo del tiempo lo que domina.

4. En 1974, Russell Hulse y Joseph Taylor descubrieron un sistema de púlsar binario: dos púlsares (estrellas de neutrones que giran rápidamente) que se orbitan entre sí. Debido a que los púlsares se mueven muy rápidamente y están muy cerca unos de otros, la relatividad general de Einstein predice que emitirán copiosas cantidades de radiación gravitacional. Aunque es bastante difícil detectar esta radiación directamente, la relatividad general muestra que la radiación debería revelarse indirectamente a través de otros medios: la energía emitida por la radiación debería hacer que el período orbital de los dos púlsares disminuya gradualmente. Los púlsares se han observado continuamente desde su descubrimiento y, de hecho, su período orbital ha disminuido, y de una manera que concuerda con la predicción de la relatividad general a aproximadamente una parte entre mil. Por lo tanto, incluso sin la detección directa de la radiación gravitacional emitida, esto proporciona una fuerte evidencia de su existencia. Por su descubrimiento, Hulse y Taylor fueron galardonados con el Premio Nobel de Física de 1993.

5. Sin embargo, véase la nota 4, más arriba.

6. Por lo tanto, desde el punto de vista energético, los rayos cósmicos proporcionan un acelerador natural que es mucho más poderoso que cualquiera de los que tenemos o que construiremos en el futuro previsible. El inconveniente es que, aunque las partículas de los rayos cósmicos pueden tener energías extremadamente altas, no tenemos control sobre lo que choca con lo que, cuando se trata de colisiones de rayos cósmicos, somos observadores pasivos. Además, el número de partículas de rayos cósmicos con una energía dada disminuye rápidamente a medida que aumenta el nivel de energía. Mientras que alrededor de 10.000 millones de partículas de rayos cósmicos con una energía equivalente a la masa de un protón (aproximadamente una milésima parte de la capacidad de diseño del Gran Colisionador de Hadrones) golpean cada kilómetro cuadrado de la superficie de la Tierra cada segundo (y bastantes atraviesan su cuerpo cada segundo también), sólo *una* de las partículas más energéticas (aproximadamente 100.000 millones de veces la masa de un protón) golpearía un determinado kilómetro cuadrado de la superficie de la Tierra cada *siglo.* Finalmente, los aceleradores pueden golpear las partículas entre sí haciendo que se muevan rápidamente, en direcciones opuestas, creando así un gran centro de energía de masa. Las partículas de rayos cósmicos, por el contrario, chocan con las partículas de movimiento relativamente lento de la atmósfera. Sin embargo, estos inconvenientes no son insuperables.

En el transcurso de muchas décadas, los experimentadores han aprendido bastante estudiando los datos de rayos cósmicos de menor energía más abundantes y, para hacer frente a la escasez de colisiones de alta energía, los experimentadores han construido enormes conjuntos de detectores para captar el mayor número posible de partículas.

7. El lector experto se dará cuenta de que la conservación de la energía en una teoría con un espacio tiempo dinámico es un asunto sutil. Ciertamente, el tensor de tensión de todas las fuentes para las ecuaciones de Einstein se conserva covariablemente. Pero esto no se traduce necesariamente en una ley de conservación global de la energía. Y con razón. El tensor de tensión no tiene en cuenta la energía gravitacional, una noción notoriamente difícil en la relatividad general. En distancias y escalas de tiempo suficientemente cortas, como las que se dan en los experimentos con aceleradores, la conservación local de la energía es válida, pero las afirmaciones sobre la conservación global deben ser tratadas con mayor cuidado.

8. Esto es cierto para los modelos inflacionarios más simples. Los investigadores han encontrado que las realizaciones más complicadas de la inflación pueden suprimir la producción de ondas gravitacionales.

9. Una candidata viable para la materia oscura debe ser una partícula estable, o de muy larga vida, que no se desintegre en otras partículas. Esto se espera que sea cierto para la más clara de las partículas compañeras supersimétricas, y por lo tanto la afirmación más precisa es que la más clara de las partículas zino, higgsino o fotino es un candidato adecuado para la materia oscura.

10. No hace mucho tiempo, un grupo de investigación conjunto italo-chino conocido como el Experimento de Materia Oscura (DAMA), que trabaja en el Laboratorio Gran Sasso de Italia, hizo el emocionante anuncio de que habían logrado la primera detección directa de materia oscura. Hasta ahora, sin embargo, ningún otro grupo ha sido capaz de verificar la afirmación. De hecho, otro experimento, la Búsqueda Criogénica de Materia Oscura (CDMS), con sede en Stanford y en el que participan investigadores de los Estados Unidos y Rusia, ha acumulado datos que muchos creen que descartan los resultados del DAMA con un alto grado de confianza. Además de estas búsquedas de materia oscura, muchas otras están en marcha. Para leer sobre algunas de ellas, eche un vistazo a *http://hepwww.rl.ac.uk/ukdmc/dark_matter/other_searches.htm .*

Capítulo 15

1. Esta declaración ignora los enfoques de variables ocultas, como el de Bohm. Pero incluso en tales enfoques, querríamos teletransportar el estado cuántico de un objeto (su función de onda), por lo que una simple medición de la posición o la velocidad sería inadecuada.

2. El grupo de investigación de Zeilinger también incluía a Dick Bouwmeester, Jian-Wi Pan, Klaus Mattle, Manfred Eibl y Harald Weinfurter, y el de De Martini ha incluido a S. Giacomini, G. Milani, F. Sciarrino y E. Lombardi.

3. Para el lector que esté familiarizado con el formalismo de la mecánica cuántica, aquí están los pasos esenciales de la teletransportación cuántica. Imaginemos que el estado inicial de un fotón que tengo en Nueva York viene dado por | > 1 = $_{|0>}$ 1 + |1> 1 donde |0> y |1> son los dos estados de polarización del fotón, y permitimos valores definidos, normalizados, pero arbitrarios de los coeficientes.

Mi objetivo es darle a Nicholas suficiente información para que pueda producir un fotón en Londres en exactamente el mismo estado cuántico. Para ello, Nicholas y yo primero adquirimos un par de fotones enredados en el estado, digamos | > 23 = (1/sqrt2) |0 2 0 3 > - (1 / s q r t 2)|1 2 1 3 >. El estado inicial del sistema de tres fotones es por lo tanto | > 123 = (/sqrt2) {|0 1 0 2 0 3 > - |0 1 1 2 1 3 >} + (/sqrt2) {|1 1 0 2 0 3 > - |1 1 1 2 1 3 >}. Cuando realizo una medición del estado de la campana en los fotones 1 y 2, proyecto esta parte del sistema en uno de los cuatro estados: | > ± = (1/sqrt2) {|0 1 0 2 > ± |1 1 1 2 >} y | >± = (1/sqrt2) {|0 1 1 2 > ± |1 1 0 2 >}. Ahora, si reexpresamos el estado inicial usando esta base de eigenstates para las partículas 1 y 2, encontramos: | > 123 = 1 /2{| > + (|0 3 > — |1 3 >) + | > — (|0 3 > + |1 3 >) + | >+ (— |1 3 > + |0 3 >) + |Ω>— (— |1 3 > — |0 3 >}. Así, después de realizar mi medición, "colapsaré" el sistema en uno de estos cuatro sumandos. Una vez que le comunique a Nicholas (por medios ordinarios), qué sumando encuentro, él sabrá cómo manipular el Fotón 3 para reproducir el estado original del Fotón 1. Por ejemplo, si encuentro que mi medición da un estado | > - , entonces Nicholas no necesita hacerle nada al Fotón 3, ya que, como arriba, ya está en el estado original del Fotón 1. Si encuentro cualquier otro resultado, Nicholas tendrá que realizar una rotación adecuada (dictada, como podéis ver, por el resultado que encuentre), para poner el Fotón 3 en el estado deseado.

4. De hecho, el lector con inclinación matemática notará que no es difícil probar el llamado teorema de no-clonación cuántica. Imaginen que tenemos un operador de clonación unitario U que toma cualquier estado dado como entrada y produce dos copias de él como salida.
>, para cualquier estado de entrada | >). Ten en cuenta que la U actuando en un estado como (| > + | >) produce (| > + ||||||||||||| de un estado como (||||||||||)
>), que no es una copia doble del estado original (| > + | >)(| > + | >), y por lo tanto no existe tal operador U para llevar a cabo la clonación cuántica. (Esto fue mostrado por primera vez por Wootters y Zurek a principios de los años 80.)

5. Muchos investigadores han participado en el desarrollo tanto de la teoría como de la realización experimental de la teletransportación cuántica. Además de los discutidos en el texto, el trabajo de Sandu Popescu mientras estaba en la Universidad de Cambridge jugó un papel importante en los experimentos de Roma, y el grupo de Jeffrey Kimble en el Instituto Tecnológico de California ha sido pionero en la teletransportación de características continuas de un estado cuántico, por nombrar algunas.

6. Para un progreso extremadamente interesante sobre el enredo de sistemas de muchas partículas, véase, por ejemplo, B. Julsgaard, A. Kozhekin, y E. S. Polzik, "Experimental long-lived entanglement of two macroscopic objects", *Nature* 413 (Sept. 2001), 400-403.

7. Una de las áreas de investigación más excitantes y activas que utilizan el entrelazamiento cuántico y la teletransportación cuántica es el campo de la computación cuántica. Para presentaciones recientes a nivel general de la informática cuántica, véase Tom Siegfried, *The Bit and the Pendulum* (Nueva York: John Wiley, 2000), y George Johnson, *A Shortcut Through Time* (Nueva York: Knopf, 2003).

8. Un aspecto de la ralentización del tiempo a velocidad creciente, que no discutimos en el capítulo 3 pero que jugará un papel en este capítulo, es la llamada paradoja gemela.

La cuestión es simple de establecer: si usted y yo nos movemos en relación con el otro a una velocidad constante, pensaré que su reloj está corriendo lento en relación con el mío. Pero como usted está tan justificado como yo al afirmar que está en reposo, pensará que el mío es el reloj en movimiento y por lo tanto es el que va más lento. Que cada uno de nosotros piense que el reloj del otro va lento puede parecer paradójico, pero no lo es. A velocidad constante, nuestros relojes continuarán alejándose y por lo tanto no permiten una comparación directa, cara a cara, para determinar cuál está "realmente" corriendo lento. Y todas las demás comparaciones indirectas (por ejemplo, comparamos las horas de nuestros relojes por comunicación telefónica) ocurren con algún tiempo transcurrido sobre alguna separación espacial, poniendo necesariamente en juego las complicaciones de las diferentes nociones de *ahora de los observadores,* como en los capítulos 3 y 5. No voy a repasar esto aquí, pero cuando estas complicaciones relativistas especiales se pliegan en el análisis, no hay contradicción entre cada uno de nosotros declarando que el reloj del otro está corriendo lento (ver, por ejemplo, E. Taylor y J. A. Wheeler, *Spacetime Physics,* para una discusión completa, técnica, pero elemental) . Donde las cosas parecen volverse más desconcertantes es si, por ejemplo, usted disminuye la velocidad, se detiene, da la vuelta y se dirige hacia mí para que podamos comparar nuestros relojes cara a cara, eliminando las complicaciones de las diferentes nociones de ahora. En nuestro encuentro, ¿el reloj de quién estará delante del de quién? Esta es la llamada paradoja de los gemelos: si tú y yo somos gemelos, cuando nos encontremos de nuevo, ¿tendríamos la misma edad, o uno de nosotros parecería más viejo? La respuesta es que mi reloj estará adelantado al suyo. Si somos gemelos, pareceré más viejo. Hay muchas maneras de explicar el porqué, pero la más sencilla de señalar es que cuando cambias tu velocidad y experimentas una aceleración, la simetría entre nuestras perspectivas se pierde -puedes afirmar definitivamente que *te* estabas moviendo (ya que, por ejemplo, *lo sentías-* o, utilizando la discusión del capítulo 3, a diferencia de la mía, tu viaje a través del espacio tiempo no ha sido en línea recta) y, por lo tanto, tu reloj corría más lento que el mío. Menos tiempo transcurrió para ti que para mí.

9. John Wheeler, entre otros, ha sugerido un posible papel central para los observadores en un universo cuántico, resumido en uno de sus famosos aforismos: "Ningún fenómeno elemental es un fenómeno hasta que es un fenómeno observado". Puede leer más sobre la fascinante vida de Wheeler en la física en John Archibald Wheeler y Kenneth Ford, *Geons, Agujeros Negros y Espuma Cuántica: A Life in Physics* (Nueva York: Norton, 1998). Roger Penrose también ha estudiado la relación entre la física cuántica y la mente en su libro *The Emperor's New Mind (La nueva mente del emperador),* y también en *Shadows of the Mind (Sombras de la mente): A Search for the Missing Scienceof Consciousness* (Oxford: Oxford University Press, 1994).

10. Véase, por ejemplo, "Respuesta a las críticas" en *Albert Einstein, vol*. 7 de *The Library of*
Living Philosophers, P. A. Schilpp, ed. (Nueva York: MJF Books, 2001).

11. W. J. van Stockum, Proc. R. Soc. Edin. A 57 (1937), 135.

El lector experto reconocerá que estoy simplificando. En 1966, Robert Geroch, que era un estudiante de John Wheeler, demostró que es al menos posible, en principio, construir un agujero de gusano sin romper el espacio. Pero a diferencia del enfoque más intuitivo, que utiliza el espacio para construir agujeros de gusano en los que la mera existencia del agujero de gusano no implica un viaje en el tiempo, en el enfoque de Geroch la fase de construcción en sí misma requeriría necesariamente que el tiempo se

distorsionara tanto que se pudiera viajar libremente hacia atrás y hacia delante en el tiempo (pero no más allá del inicio de la construcción en sí misma).
12.

13. En términos generales, si usted pasara por una región que contiene tal materia exótica a casi la velocidad de la luz y tomara el promedio de todas sus mediciones de la densidad de energía que detectó, la respuesta que encontraría sería negativa. Los físicos dicen que tal materia exótica viola la llamada condición de energía débil promediada.

14. La realización más simple de la materia exótica proviene de las fluctuaciones de vacío del campo electromagnético entre las placas paralelas en el experimento de Casimir, discutido en el Capítulo 12. Los cálculos muestran que la disminución de las fluctuaciones cuánticas entre las placas, en relación con el espacio vacío, conlleva una densidad de energía media negativa (así como una presión negativa).

15. Para un relato pedagógico pero técnico de los agujeros de gusano, ver Matt Visser, *LorentzianWormholes: From Einstein to Hawking* (Nueva York: American Institute of Physics Press, 1996).

Capítulo 16

1. Para el lector con inclinación matemática, recuerde de la nota 6 del capítulo 6 que la entropía se define como el *logaritmo* del número de reordenamientos (o estados), y eso es importante para obtener la respuesta correcta en este ejemplo. Cuando se unen dos recipientes Tupperware, los diversos estados de las moléculas de aire pueden describirse dando el estado de las moléculas de aire del primer recipiente, y luego dando el estado de las del segundo. Así, el número de disposiciones de los recipientes unidos es el cuadrado del número de disposiciones de cada uno de ellos por separado. Después de tomar el logaritmo, esto nos dice que la entropía se ha duplicado.

2. Notarán que no tiene mucho sentido comparar un volumen con un área, ya que tienen diferentes unidades. Lo que realmente quiero decir aquí, como lo indica el texto, es que la velocidad a la que el volumen crece con el radio es mucho más rápida que la velocidad a la que crece el área de la superficie. Por lo tanto, como la entropía es proporcional al área de la superficie y no al volumen, crece más lentamente con el tamaño de una región de lo que lo haría si fuera proporcional al volumen.

3. Aunque esto captura el espíritu de la entropía ligada, el lector experto reconocerá que estoy simplificando. El límite más preciso, como propone Raphael Bousso, establece que el flujo de entropía a través de una hipersuperficie nula (con un parámetro de enfoque no positivo en todas partes) está limitado por A/4, donde A es el área de una sección transversal espacial de la hipersuperficie nula (la "hoja de luz").

4. Más precisamente, la entropía de un agujero negro es el área de su horizonte de sucesos, expresada en unidades de Planck, dividida por 4, y multiplicada por la constante de Boltzmann.

5. El lector con inclinación matemática puede recordar de las notas finales del Capítulo 8 que hay otra noción de horizonte -un horizonte cósmico- que es la superficie divisoria entre aquellas cosas con las que un observador puede y no puede estar en contacto causal. También se cree que tales horizontes soportan la entropía, de nuevo proporcional a su superficie.

6. En 1971, el físico de origen húngaro Dennis Gabor fue galardonado con el Premio Nobel por el descubrimiento de algo llamado *holografía.* Motivado inicialmente por el objetivo de mejorar el poder de resolución de los microscopios electrónicos, Gabor trabajó en la década de 1940 en la búsqueda de formas de capturar más información codificada en las ondas de luz que rebotan en un objeto. Una cámara, por ejemplo, registra la intensidad de esas ondas de luz; los lugares en que la intensidad es alta dan lugar a regiones más brillantes de la fotografía, y los lugares en que es baja son más oscuros. Gabor y muchos otros se dieron cuenta, sin embargo, de que la intensidad es sólo una parte de la información que llevan las ondas de luz. Lo vimos, por ejemplo, en la figura 4.2b: mientras que el patrón de interferencia se ve afectado por la intensidad (la amplitud) de la luz (las ondas de mayor amplitud producen un patrón general más brillante), el patrón en sí mismo surge porque las ondas superpuestas que emergen de cada una de las rendijas alcanzan su pico, su depresión y varias alturas de onda intermedias en diferentes lugares a lo largo de la pantalla del detector. Esta última información se denomina *información de fase: se* dice que dos ondas de luz en un punto determinado están *en fase* si se refuerzan mutuamente (cada una alcanza un pico o una depresión al mismo tiempo), *fuera de fase* si se cancelan mutuamente (una alcanza un pico mientras la otra alcanza una depresión) y, más generalmente, tienen relaciones de fase intermedias entre estos dos extremos en los puntos en que se refuerzan o cancelan parcialmente. Así pues, un patrón de interferencia registra información de fase de las ondas luminosas que interfieren.

Gabor desarrolló un medio para registrar, en una película especialmente diseñada, tanto la intensidad como la información de fase de la luz que rebota en un objeto. Traducido al lenguaje moderno, su enfoque es muy similar al de la configuración experimental de la figura 7.1, excepto que uno de los dos rayos láser se hace rebotar en el objeto de interés en su camino hacia la pantalla del detector. Si la pantalla está equipada con una película que contiene la emulsión fotográfica apropiada, registrará un patrón de interferencia -en forma de líneas diminutas y grabadas en la superficie de la película- entre el rayo sin trabas y el que se ha reflejado en el objeto. El patrón de interferencia codificará tanto la intensidad de la luz reflejada como las relaciones de fase entre los dos haces de luz. Las ramificaciones de la visión de Gabor para la ciencia han sido sustanciales, permitiendo grandes mejoras en una amplia gama de técnicas de medición. Pero para el público en general, el impacto más destacado ha sido el desarrollo artístico y comercial de los hologramas.

Las fotografías ordinarias parecen planas porque sólo registran la intensidad de la luz. Para obtener la profundidad, se necesita información de las fases. La razón es que, a medida que una onda de luz viaja, pasa de un pico a una depresión y de nuevo a un pico, por lo que la información de fase -o, más precisamente, las diferencias de fase entre los haces de luz que se reflejan en las partes cercanas de un objeto- codifica las diferencias en la distancia que han recorrido los rayos de luz. Por ejemplo, si se mira a un gato de frente, sus ojos están un poco más lejos que su nariz y esta diferencia de profundidad está codificada en la diferencia de fase entre los rayos de luz que se reflejan en cada elemento facial. Al hacer brillar un láser a través de un holograma, somos capaces de explotar la información de fase que el holograma registra, y así añadir profundidad a la imagen.

Todos hemos visto los resultados: sorprendentes proyecciones tridimensionales generadas a partir de piezas bidimensionales de plástico. Sin embargo, tened en cuenta que vuestros ojos no utilizan la información de fase para ver la profundidad. En su lugar, sus ojos usan paralaje: la ligera diferencia en los ángulos en los que la luz de un punto dado viaja para alcanzar su ojo izquierdo y su ojo derecho suministra información que su cerebro decodifica en la distancia del punto. Por eso, por ejemplo, si pierdes la vista en un ojo (o lo mantienes cerrado un rato), tu percepción de la profundidad se ve comprometida.

7. Para el lector matemáticamente inclinado, la afirmación aquí es que un rayo de luz, o partículas sin masa más generalmente, puede viajar desde cualquier punto en el interior del espacio antideSitter al infinito espacial y de vuelta, en un tiempo finito.

8. Para el lector con inclinación matemática, Maldacena trabajó en el contexto de $AdS_5 \times S^5$, con la teoría del límite que surge de la frontera de AdS_5.

9. Esta afirmación es más de sociología que de física. La teoría de cuerdas surgió de la tradición de la física de partículas cuánticas, mientras que la gravedad cuántica de bucles surgió de la tradición de la relatividad general. Sin embargo, es importante señalar que, a día de hoy, sólo la teoría de cuerdas puede entrar en contacto con las exitosas predicciones de la relatividad general, ya que sólo la teoría de cuerdas se reduce convincentemente a la relatividad general a grandes escalas de distancia. La gravedad cuántica de bucle se entiende bien en el dominio cuántico, pero tender un puente a los fenómenos a gran escala ha resultado difícil.

10. Más precisamente, como se discute más adelante en el capítulo 13 de *El Universo Elegante,* hemos sabido cuánta entropía contienen los agujeros negros desde el trabajo de Bekenstein y Hawking en la década de 1970. Sin embargo, el enfoque que utilizaron esos investigadores fue más bien indirecto, y nunca identificaron reordenamientos microscópicos - como en el capítulo 6 - que explicaran la entropía que encontraron. A mediados de la década de 1990, este vacío fue llenado por dos teóricos de cuerdas, Andrew Strominger y Cumrun Vafa, que hábilmente encontraron una relación entre los agujeros negros y ciertas configuraciones de branas en la teoría de cuerdas/M. Aproximadamente, fueron capaces de establecer que ciertos agujeros negros especiales admitirían exactamente el mismo número de reordenamientos de sus ingredientes básicos (cualesquiera que sean esos ingredientes) que las combinaciones particulares y especiales de branas. Cuando contaron el número de tales reordenamientos de branas (y tomaron el logaritmo) la respuesta que encontraron fue el área del agujero negro correspondiente, en unidades de Planck, dividida por 4 exactamente la respuesta para la entropía de los agujeros negros que se había encontrado años antes. En la gravedad cuántica de bucle, los investigadores también han podido demostrar que la entropía de un agujero negro es proporcional a su área de superficie, pero obteniendo la respuesta exacta (área de superficie en unidades de Planck dividida por 4) ha demostrado ser más difícil. Si un parámetro particular, conocido como el parámetro de Immirzi, se elige adecuadamente, entonces, de hecho, la entropía exacta del agujero negro emerge de las matemáticas de la gravedad cuántica de bucles, pero hasta ahora no hay una explicación fundamental universalmente aceptada, dentro de la propia teoría, de lo que establece el valor correcto de este parámetro.

11. Como he hecho a lo largo del capítulo, estoy suprimiendo parámetros numéricos cuantitativamente importantes pero conceptualmente irrelevantes.

Glosario

espacio absoluto: La visión de Newton del espacio; visualiza el espacio como inalterable e independiente de su contenido.

el espacio tiempo absoluto: Visión del espacio que emerge de la relatividad especial; visualiza el espacio a través de la totalidad del tiempo, desde cualquier perspectiva, como inmutable e independiente de su contenido.

absolutista: La perspectiva que sostiene que el espacio es absoluto.

aceleración: Movimiento que implica un cambio de velocidad y/o dirección.

acelerador, destructora de átomos: Herramienta de investigación de la física de partículas que colisiona partículas a alta velocidad.

éter, éter luminiscente: Sustancia hipotética que llena el espacio que proporciona el medio para que la luz se propague; desacreditada.

flecha del tiempo: Dirección en la que el tiempo parece apuntar del pasado al futuro.

independencia de fondo: Propiedad de una teoría física en la que el espacio y el tiempo emergen de un concepto más fundamental, en lugar de ser insertado axiomáticamente.

teoría del big bang/teoría estándar del big bang: Teoría que describe un universo caliente y en expansión desde un momento después de su nacimiento.

un gran crujido: Un posible final del universo, análogo al reverso del big bang en el que el espacio se colapsa sobre sí mismo.

agujero negro: Un objeto cuyo inmenso campo gravitatorio atrapa cualquier cosa, incluso la luz, que se acerque demasiado (más cerca que el horizonte de sucesos del agujero negro).

escenario de Braneworld: Posibilidad dentro de la teoría de cuerdas M de que nuestras conocidas dimensiones espaciales sean una tresbrana.

La fuerza de Casimir: Fuerza mecánica cuántica ejercida por un desequilibrio de las fluctuaciones del campo de vacío.

la física clásica: Como se utiliza en este libro, las leyes físicas de Newton y Maxwell. Más en general, a menudo se utiliza para referirse a todas las leyes de la física no cuántica, incluyendo la relatividad especial y general.

cuerdas cerradas: Filamentos de energía en la teoría de las cuerdas, en forma de bucles.

colapso de la onda de probabilidad, colapso de la función de onda: Desarrollo hipotético en el que una onda de probabilidad (una función de onda) pasa de una forma extendida a una forma de pico.

Interpretación de Copenhague: Interpretación de la mecánica cuántica que prevé que los grandes objetos están sujetos a las leyes clásicas y los pequeños objetos están sujetos a las leyes cuánticas.

radiación de fondo de microondas cósmicas: Radiación electromagnética remanente (fotones) del universo primitivo, que impregna el espacio.

horizonte cósmico, horizonte: Localizaciones en el espacio más allá de las cuales la luz no ha tenido tiempo de llegar a nosotros, desde el principio del universo.

Constante cosmológica: Una hipotética energía y presión, que llena el espacio de manera uniforme; origen y composición desconocidos.

cosmología: Estudio del origen y la evolución del universo. Densidad crítica: Cantidad de densidad de masa/energía necesaria para que el espacio sea plano; unos 10^{-23} gramos por metro cúbico.

D-branas, Dirichlet *-p-branas*: Una p-brana que es "pegajosa"; una p-brana a la que se le unen puntos finales de cuerda abierta.

energía oscura: Una energía y presión hipotética, que llena el espacio de manera uniforme; noción más general que una constante cosmológica ya que su energía/presión puede variar con el tiempo.

materia oscura: Materia que se esparce por el espacio, ejerciendo la gravedad pero sin

emitir luz. campo electromagnético: El campo que ejerce la fuerza electromagnética.

fuerza electromagnética: Una de las cuatro fuerzas de la naturaleza; actúa sobre las partículas que tienen carga eléctrica.

campo de electrones: El campo para el cual la partícula de electrón es el más pequeño paquete o componente.

la teoría electrodébil: La teoría que unifica las fuerzas electromagnéticas y nucleares débiles en la fuerza electrodébil.

el campo de Higgs de electroweak: Campo que adquiere un valor distinto de cero en el espacio frío y vacío; da lugar a masas para partículas fundamentales.

un cuenco de energía: Ver *potencial tazón de energía.*

entropía: Una medida del desorden de un sistema físico; el número de reordenamientos de los constituyentes fundamentales de un sistema que dejan su apariencia general sin cambios.

entrelazamiento, entrelazamiento cuántico: Fenómeno cuántico en el que partículas distantes espacialmente tienen propiedades correlacionadas.

horizonte de sucesos: Esfera imaginaria que rodea a un agujero negro, delineando los puntos de no retorno; cualquier cosa que cruce el horizonte de sucesos no puede escapar del campo de gravedad del agujero negro: Una "niebla" o "esencia" que impregna el espacio; puede transmitir una fuerza o describir la presencia/movimiento de partículas. Matemáticamente, implica un número o colección de números en cada punto del espacio, lo que significa el valor del campo.

espacio plano: Posible forma del universo espacial sin curvatura.

Problema de la planicie: Desafío para que las teorías cosmológicas expliquen la planicie observada del espacio.

la relatividad general: La teoría de la gravedad de Einstein; invoca la curvatura del

espacio y el tiempo. Los gluones: Partículas mensajeras de la fuerza nuclear fuerte.

gravitones: Hipotéticas partículas mensajeras de la fuerza gravitatoria.

gran unificación: Teoría que intenta unificar las fuerzas fuertes, débiles y electromagnéticas.

Campo de Higgs: Ver *el campo de Higgs electrodependiente.*

Valor de expectativa del vacío del campo de Higgs: Situación en la que un campo de Higgs adquiere un valor distinto de cero en el espacio vacío; un océano de Higgs.

Océano de Higgs: Taquigrafía, peculiar de este libro, para un valor de expectativa de vacío del campo de Higgs.

Partículas de Higgs: Los componentes cuánticos más finos de un campo de Higgs.

Problema del horizonte: Desafío para las teorías cosmológicas de explicar cómo las regiones del espacio, más allá del horizonte cosmológico de cada una, tienen propiedades casi idénticas.

inercia: Propiedad de un objeto que se resiste a ser acelerado.

cosmología inflacionaria: Teoría cosmológica que incorpora un breve pero enorme estallido de expansión espacial en el universo temprano.

campo de inflado: El campo cuya energía y presión negativa impulsa la expansión inflacionaria.

interferencia: Fenómeno en el que las ondas superpuestas crean un patrón distintivo; en la mecánica cuántica, implica alternativas aparentemente exclusivas que se combinan entre sí.

La teoría de Kaluza-Klein: Teoría del universo que involucra más de tres dimensiones espaciales.

Kelvin: Escala en la que las temperaturas se citan en relación con el cero absoluto (la temperatura más baja posible, -273° en la escala Celsius). éter luminífero: Ver éter.

Teoría M: Teoría actualmente incompleta que unifica las cinco versiones de la teoría de cuerdas; una teoría mecánica totalmente cuántica de todas las fuerzas y toda la materia.

El principio de Mach: Principio de que todo movimiento es relativo y que el estándar de descanso es proporcionado por la distribución media de la masa en el universo.

La interpretación de muchos mundos: Interpretación de la mecánica cuántica en la que todas las potencialidades encarnadas por una onda de probabilidad se realizan en universos separados.

partícula mensajera: El más pequeño "paquete" o "haz" de una fuerza, que comunica la influencia de las fuerzas.

radiación de fondo de microondas: Ver Radiación *cósmica de fondo de microondas.*

curvatura negativa: Forma del espacio que contiene menos de la densidad crítica; en forma de silla de montar.

universo observable: Parte del universo dentro de nuestro horizonte cósmico; parte del universo lo suficientemente cerca como para que la luz que emitió pueda haber llegado hasta nosotros hoy; parte del universo que podemos ver.

...abrir las cuerdas: Filamentos de energía en la teoría de cuerdas, en forma de retazos. *p-* brane: Ingrediente de la teoría de cuerdas/M con dimensiones p-espaciales. Ver también D-brane.

La longitud de Planck: Tamaño (10^{-33} centímetros) por debajo del cual se manifiesta el conflicto entre la mecánica cuántica y la relatividad general; tamaño por debajo del cual se rompe la noción convencional de espacio.

Masa de Planck: Masa (10^{-5} gramos, masa de un grano de polvo; diez mil millones de billones de veces la masa del protón); masa típica de una cuerda vibrante.

Hora de Planck: Tiempo (10^{-43} segundos) que tarda la luz en atravesar una longitud de Planck; intervalo de tiempo por debajo del cual se rompe la noción convencional de tiempo.

transición de fase: Cambio cualitativo en un sistema físico cuando su temperatura varía a través de un rango suficientemente amplio.

fotón: Partícula mensajera de la fuerza electromagnética; un "haz" de luz.

Energía potencial: Energía almacenada en un campo u objeto.

un potencial tazón de energía: Forma que describe la energía que contiene un campo para un valor de campo dado; técnicamente llamada la energía potencial del campo.

onda de probabilidad: Onda de mecánica cuántica que codifica la probabilidad de que una partícula se encuentre en un lugar determinado.

cromodinámica cuántica: Teoría de la mecánica cuántica de la fuerza nuclear fuerte.

fluctuaciones cuánticas, nerviosismo cuántico: Las inevitables y rápidas variaciones en el valor de un campo a pequeña escala, que surgen de la incertidumbre cuántica.

Problema de medición cuántica: Problema de explicar cómo las innumerables posibilidades codificadas en una onda de probabilidad dan paso a un único resultado cuando se mide.

mecánica cuántica: Teoría, desarrollada en los años 20 y 30, para describir el reino de los átomos y las partículas subatómicas.

quarks: Partículas elementales sometidas a una fuerte fuerza nuclear; hay seis variedades (arriba, abajo, extraño, encanto, arriba, abajo).

relacionista: Perspectiva que sostiene que todo movimiento es relativo y el espacio no es absoluto.

invariancia rotacional, simetría rotacional: Característica de un sistema físico, o de una ley teórica, de no ser afectado por una rotación.

segunda ley de la termodinámica: Ley que dice que, en promedio, la entropía de un sistema físico tenderá a aumentar a partir de un momento dado.

el espacio tiempo: La unión del espacio y el tiempo articulada por primera vez por la relatividad especial.

la relatividad especial: La teoría de Einstein en la que el espacio y el tiempo no son individualmente absolutos, sino que dependen del movimiento relativo entre distintos observadores. spin: Propiedad mecánica cuántica de las partículas elementales en las que, algo así como una cima, se someten a un movimiento de rotación (tienen un momento angular intrínseco).

la simetría espontánea se rompe: Nombre técnico para la formación de un océano de Higgs; proceso por el cual una simetría previamente manifiesta se oculta o se estropea.

velas estándar: Objetos de un brillo intrínseco conocido que son útiles para medir distancias astronómicas.

modelo estándar: Teoría de la mecánica cuántica compuesta por la cromodinámica cuántica y la teoría electrodébil; describe toda la materia y las fuerzas, excepto la gravedad. Basada en la concepción de las partículas puntuales.

una fuerte fuerza nuclear: Fuerza de la naturaleza que influye en los quarks; mantiene a los quarks unidos dentro de los protones y neutrones.

la teoría de las cuerdas: Teoría basada en filamentos vibratorios unidimensionales de energía (ver teoría de supercuerdas), pero que no necesariamente incorpora la supersimetría. A veces se usa como abreviatura de la teoría de las supercuerdas.

la teoría de las supercuerdas: Teoría en la que los ingredientes fundamentales son bucles unidimensionales (cuerdas cerradas) o retazos (cuerdas abiertas) de energía vibratoria, que une la relatividad general y la mecánica cuántica; incorpora la supersimetría.

supersimetría: Una simetría en la que las leyes no cambian cuando las partículas con un número entero de espín (partículas de fuerza) se intercambian con partículas que tienen la mitad de un número entero de espín (partículas de materia).

simetría: Una transformación en un sistema físico que deja la apariencia del sistema sin cambios (por ejemplo, una rotación de una esfera perfecta alrededor de su centro deja la esfera

sin cambios); una transformación de un sistema físico que no tiene efecto sobre las leyes que describen el sistema.

simetría de tiempo invertido: Propiedad de las leyes de la naturaleza aceptadas en las que las leyes no hacen distinción entre una dirección en el tiempo y la otra. Desde un momento dado, las leyes tratan el pasado y el futuro exactamente de la misma manera.

...una rebanada de tiempo: Todo el espacio en un momento del tiempo; una sola rebanada a través del bloque o pan de espacio tiempo.

invariancia translacional, simetría translacional: Propiedad de las leyes de la naturaleza aceptadas en las que las leyes son aplicables en cualquier lugar del espacio.

principio de incertidumbre: Propiedad de la mecánica cuántica en la que existe un límite fundamental sobre la precisión con la que pueden medirse o especificarse ciertos rasgos físicos complementarios.

la teoría unificada: Una teoría que describe todas las fuerzas y toda la materia en una sola estructura teórica.

Vacío: El más vacío que una región puede ser; el estado de menor energía.

fluctuaciones del campo de vacío: Ver fluctuaciones *cuánticas.* Velocidad: La velocidad y dirección del movimiento de un objeto.

Partículas W y Z: Las partículas mensajeras de la fuerza nuclear débil. La

función de onda: Ver onda de *probabilidad.*

fuerza nuclear débil: Fuerza de la naturaleza, que actúa en escalas subatómicas, y responsable de fenómenos como la desintegración radiactiva.

información de qué camino: Información de mecánica cuántica que delinea el camino que tomó una partícula para ir de la fuente al detector.

Sugerencias para la lectura adicional

La literatura general y técnica sobre el espacio y el tiempo es vasta. Las referencias que figuran a continuación, que en su mayor parte son adecuadas para un lector general, pero algunas requieren una formación más avanzada, me han resultado útiles y son un buen comienzo para el lector que desee explorar más a fondo los diversos avances que se abordan en este libro.

Albert, David. *Mecánica Cuántica y Experiencia.* Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press, 1994.

———. *Tiempo y oportunidad.* Cambridge, Mass.: Harvard University Press, 2000. Alexander, H. G. *La correspondencia Leibniz-Clarke.* Manchester, Eng.: Manchester University Press, 1956.

Barbour, Julian. *El fin del tiempo.* Oxford: Oxford University Press, 2000.

---y Herbert Pfister. El principio de Mach. Boston: Birkhäuser, 1995. Barrow,

John. *El Libro de la Nada.* Nueva York: Pantheon, 2000.

Bartusiak, Marcia. La Sinfonía Inacabada de Einstein. Washington, D.C.: Joseph Henry Press, 2000.

Campana, John. *Hablable e indecible en la mecánica cuántica.* Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1993.

Blanchard, Ph., y D. Giulini, E. Joos, C. Kiefer, I.-O Stamatescu. Decoherencia: Theo *problemas reticos, experimentales y conceptuales.* Berlín: Springer, 2000.

Callender, Craig y Nick Hugget. *La física se encuentra con la filosofía en la escala de Planck.*
Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 2001.

Cole, K. C. El agujero en el universo. Nueva York: Harcourt, 2001.

Pliegue, Robert y Charles Mann. *La segunda creación.* New Brunswick, N.J.: Rutgers University Press, 1996.

Davies, Paul. *Ya era hora.* Nueva York: Simon & Schuster, 1995.

———. *Cómo construir una máquina del tiempo.* Nueva York: Allen Lane, 2001.

———. *El Espacio y el Tiempo en el Universo Moderno.* Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1977.

D'Espagnat, Bernard. *Realidad Velada.* Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1995.

Deutsch, David. *El tejido de la realidad.* New York: Allen Lane, 1997.

Ferris, Timothy. *La mayoría de edad en la Vía Láctea.* Nueva York: Anchor, 1989.

———. *Todo el Shebang.* Nueva York: Simon & Schuster, 1997. Feynman,

Richard. *QED.* Princeton: Princeton University Press, 1985. Fölsing,

Albrecht. *Albert Einstein.* Nueva York: Viking, 1997.

Gell-Mann, Murray. El Quark y el Jaguar. Nueva York: W. H. Freeman, 1994. Gleick, James. *Isaac Newton.* Nueva York: Pantheon, 2003.

Gott, J. Richard. *Viaje en el tiempo en el Universo de Einstein.* Boston: Houghton Mifflin, 2001. Guth, Alan. *El Universo Inflacionario.* Reading, Mass.: Perseo, 1997.

Greene, Brian. *El Universo Elegante.* Nueva York: Vintage, 2000.

Gribbin, John. Los *gatitos de Schrödinger y la búsqueda de la realidad.* Boston: Little, Brown, 1995.

Hall, A. Rupert. *Isaac Newton.* Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1992. Halliwell, J. J., J. Pérez-Mercader, y W. H. Zurek. Physical Origins of Time Asymmetry. Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 1994.

Hawking, Stephen. *El Universo en una cáscara de nuez.* Nueva York: Bantam, 2001.

--- y Roger Penrose. *La naturaleza del espacio y el tiempo.* Princeton: Princeton University Press, 1996.

---, Kip Thorne, Igor Novikov, Timothy Ferris y Alan Lightman. *El futuro del espacio tiempo.* Nueva York: Norton, 2002.

Jammer, Max. *Conceptos del espacio.* Nueva York: Dover, 1993.

Johnson, George. *Un atajo a través del tiempo.* Nueva York: Knopf,

2003. Kaku, Michio. *Hiperespacio.* Nueva York: Oxford University

Press, 1994.

Kirschner, Robert. *El Universo Extravagante.* Princeton: Princeton University Press, 2002. Krauss, Lawrence. *Quintessence.* Nueva York: Perseo, 2000.

Lindley, David. El Átomo *de Boltzmann.* Nueva York: Free Press, 2001.

———. *¿A dónde va la rareza? A* Nueva York: Basic Books, 1996. Mach,

Ernst. *La ciencia de la mecánica.* La Salle, Ill.: Open Court, 1989.

Maudlin, Tim. La *no localidad cuántica y la relatividad.* Malden, Mass.: Blackwell, 2002.

Mermin, N. David. *Boojums todo el camino.* Nueva York: Cambridge University Press, 1990.

Adiós, Dennis. Corazones Solitarios del Cosmos. Nueva York: HarperCollins, 1991.

Pais, Abraham. *Sutil es el Señor.* Oxford: Oxford University Press, 1982.

Penrose, Roger. *La nueva mente del emperador.* Nueva York: Oxford University Press, 1989. Price, Huw. La *Flecha del Tiempo y el Punto de Arquímedes.* Nueva York: Oxford University Press, 1996. Rees, Martin. *Antes del comienzo.* Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1997.

———. *Sólo seis números.* Nueva York: Basic Books, 2001.

Reichenbach, Hans. La dirección del tiempo. Mineola, N.Y.: Dover,

1956.

———. *La filosofía del espacio y el tiempo.* Nueva York: Dover, 1958.

Savitt, Steven. *Las Flechas del Tiempo Hoy.* Cambridge, Eng.: Cambridge University Press, 2000. Schrödinger, Erwin. *¿Qué es la vida?* Cambridge, Eng.: Canto, 2000.

Siegfried, Tom. *El Bit y el Péndulo.* Nueva York: John Wiley, 2000.

Sklar, Lawrence. *Espacio, tiempo y espacio tiempo.* Berkeley: University of California Press, 1977.

Smolin, Lee. *Tres caminos hacia la gravedad cuántica.* Nueva York: Basic Books,

2001. Stenger, Victor. La realidad eterna. Amherst, N.Y.: Prometheus Books, 2000.

Thorne, Kip. Agujeros negros y Time Warps. Nueva York: W. W. Norton, 1994. von Weizsäcker, Carl Friedrich. *La unidad de la naturaleza.* Nueva York: Farrar, Straus, y Giroux, 1980.

Weinberg, Steven. *Sueños de una teoría final.* Nueva York: Panteón, 1992.

———. *Los primeros tres minutos.* Nueva York: Basic Books, 1993.

Wilczek, Frank y Betsy Devine. *Anhelando las armonías.* Nueva York: Norton, 1988. Zeh, H. D. *La base física de la dirección del tiempo.* Berlín: Springer, 2001.

BRIAN GREENE

EL TEJIDO DEL COSMOS

Brian Greene se licenció en la Universidad de Harvard y se doctoró en la Universidad de Oxford, donde fue becario Rhodes. Se unió a la facultad de física de la Universidad de Cornell en 1990, fue nombrado profesor titular en 1995, y en 1996 se unió a la Universidad de Columbia donde es profesor de física y matemáticas. Ha dado conferencias tanto a nivel general como técnico en más de veinticinco países y es ampliamente considerado por un número de descubrimientos innovadores en la teoría de las supercuerdas. Vive en los Andes, Nueva York y la ciudad de Nueva York.

TRADUCIDO POR Rey_dela_Noche@protonmail.com

https://archive.org/details/@rey_dela_noche